



TITLE:

針葉樹材中の流体流動における有  
縁壁孔膜小孔の機能(  
Dissertation\_全文)

AUTHOR(S):

大越, 誠

---

CITATION:

大越, 誠. 針葉樹材中の流体流動における有縁壁孔膜小孔の機能. 京都大学, 1982, 農学博士

ISSUE DATE:

1982-11-24

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k2842>

RIGHT:

新 制
農
358

京大附図

# 針葉樹材中の流体流動における 有縁壁孔膜小孔の機能

1982

大 越 誠

針葉樹材中の流体流動における  
有縁壁孔膜小孔の機能

1982

大 越 誠

# 目 次

序 言 .....	1
第 1 章 木材中の流体の流動と通路 .....	3
1 木材中の流動通路 .....	3
2 流体の流動理論 .....	4
2.1 液体の流動 .....	4
2.2 気体の流動 .....	6
2.3 乱流 .....	9
3 既往の研究 .....	10
4 本研究の目的と意義 .....	21
第 2 章 木材中の流動に対する阻害要因としての壁孔膜小孔 .....	23
1 定常流動阻害要因としての壁孔膜小孔 .....	23
1.1 実験材料および方法 .....	24
1.1.1 供試材料 .....	24
1.1.2 流動液体 .....	25
1.1.3 実験装置および方法 .....	26
1.2 結果と考察 .....	28
1.2.1 G F 模型 .....	28
1.2.2 木材試験体 .....	30
1.2.3 定常流動 .....	35
2 乱流の発生要因としての壁孔膜小孔 .....	37
2.1 実験材料および方法 .....	37
2.2 結果と考察 .....	39
2.2.1 分子流および乱流の発生 .....	39
2.2.2 温度の影響 .....	50

3 要 約 .....	52
第3章 壁孔膜小孔の定量的評価と流動における寄与 .....	55
1 画像解析法による壁孔膜小孔の定量的評価 .....	55
1.1 実験材料および方法 .....	56
1.1.1 供試試料 .....	56
1.1.2 解析用画像の作製 .....	56
1.1.3 画像解析 .....	58
1.2 結果と考察 .....	60
1.2.1 壁孔膜小孔の形状 .....	60
1.2.2 壁孔膜小孔の大きさ .....	63
2 壁孔膜小孔における流動体積の分布 .....	68
2.1 実験材料および方法 .....	70
2.1.1 供試材料 .....	70
2.1.2 流動液体 .....	71
2.1.3 流動実験装置 .....	72
2.2 結果と考察 .....	73
2.2.1 懸だく液の流動 .....	73
2.2.2 流動体積分布曲線 .....	76
2.2.3 液体流動における壁孔膜小孔の寄与 .....	82
3 要 約 .....	85
総 括 .....	87
結 言 .....	91
引用文献 .....	92

## 序

## 言

木材中の物質移動は木材の物理的、化学的加工の基礎として重要である。例えば利用に先立ってなされる木材の乾燥や調湿には水分移動が、木材の物理的、力学的諸性質の向上をはかる材質改良には種々の合成樹脂などの移動が、防腐・防虫・防火などの保存処理には様々な薬剤の移動が問題となる。木材中の物質移動は浸透、流動および拡散によるが、木材が多孔体である<sup>1)</sup>ため、多くの場合拡散に先立ち浸透と流動が重要となる。

このような立場から、木材中の流体の浸透や流動は古くから研究されてきたが、その通路が複雑であるためにいまだ十分に解明されていない。浸透は液体の表面張力による毛管上昇として考えられるが、その経路が複雑であり、また木材内部の浸透液体の分布状態を経時的に観察することが困難であるために、その機構は十分に解明されていない。流動あるいは透過性は圧力傾斜による毛管中の流体流動として考えられるが、木材中の通路の複雑さが流動の定常性を阻み、その原因について種々論議されてきたが十分に解明されているとは言えない。さらに、これらの通路は木材が水を失ったり得たりすることによって大きさや数が増減し、その複雑さを増大する。そこで、物質移動機構解明の一環として、主に針葉樹材について種々の流体の流動実験によって通路を定量化しようとする試みがなされてきた。<sup>2)</sup>針葉樹材中の主要な通路は仮道管内こうと有縁壁孔対の直列のものであるが、壁孔膜小孔は径が微小であるために流動の支配因子となる。したがって、これらの定量化は多くの場合壁孔膜小孔の大きさや数を等価値として評価しようとするものであった。しかし、その方法自体や計算過程で行なっているモデル化、単純化に問題のあるものもある。また、大きさや形状において広い範囲の分布を持つ壁孔膜小孔を一つの等価値で評価していることにも基本的に疑問がある。

本論文は、針葉樹材について液体および気体の流動実験によって、流動の非

定常性と壁孔膜小孔との関連を明らかにし，ついで壁孔膜のTEM（透過型電子顕微鏡）写真に画像解析法を適用して壁孔膜小孔の形状，大きさの分布を測定し，さらに数種の径の均一な球形粒子懸たく液の流動実験によって，壁孔膜小孔における流動体積の分布を明らかにして，木材中の流体流動における壁孔膜小孔の役割を検討したものであり，以下の内容を持つ。

第1章では，まず毛管中における液体と気体の流動を概説し，さらに既往の通路定量化法およびそれによって得られた結果について概説する。

第2章では，水および乾燥空気の流動実験によって，液体流動体積の経時的な低下，乱流の発生等の流動の非定常性と壁孔膜小孔との関連を検討した結果を論述する。

第3章では，壁孔膜のTEM写真の画像解析によって壁孔膜小孔の形状，径，面積の分布を明らかにし，ついで粒子懸たく液の流動実験によって壁孔膜小孔における流動体積分布さらに孔径分布を算出し，両者の結果を対比して木材中の流体の流動における壁孔膜小孔の寄与を検討した結果を論述する。

## 第 1 章 木材中の流体の流動と通路

### 1 木材中の流動通路

木材中の物質流動通路は、針葉樹材では仮道管内こうと有縁壁孔対の直列のものが主体であり、ほかに長軸方向に垂直樹脂道が、横軸方向に放射仮道管や放射柔細胞の内こうおよび水平樹脂道がある。<sup>3)</sup> 広葉樹材では道管の内こうが主体で、多数の壁孔対によって近傍の軸方向組織や放射組織の内こうに連結する。<sup>3)</sup> これら個々の通路の大きさや数、さらに相互の配列、結合などの 3 次元的なマクロ空隙構造が、木材中における流体の浸透や流動を左右することとなる。

針葉樹材の主要な構成要素である仮道管は、横断面形状が早材では放射方向に長い方形ないし六角形、晩材では扁平である。光学顕微鏡測定によるその大きさは、樹種により異なり、放射方向で早材  $20 \sim 60 \mu\text{m}$ 、晩材  $5 \sim 25 \mu\text{m}$ 、接線方向で早・晩材とも  $20 \sim 50 \mu\text{m}$  であり、長さは平均  $2.2 \sim 4.2 \text{ mm}$  である。<sup>4)</sup> しかし、仮道管は大きさがこのように横断面で変動するばかりでなく、個々の仮道管においてその両端部でテーパ状になっており、長軸方向においても断面の大きさ、形状が変動する。したがって、主要な流動通路の一つである仮道管内こうの大きさは上記の値から細胞壁厚さ（早材  $1.0 \sim 3.0 \mu\text{m}$ 、晩材  $2.0 \sim 8.0 \mu\text{m}$ <sup>4)</sup>）の 2 倍を差し引いた値であるが、横断面や長軸方向において変動するため、均一な通路と考えることはできない。

樹液流動において隣接する仮道管内こう間のバルブの役目を果す有縁壁孔対は、内こうに連なる孔口、壁孔室（壁孔膜と壁孔縁の間の空間）および壁孔膜小孔の直列な要素から成る通路である。壁孔口は早材で直径数  $\mu\text{m}$ 、晩材ではそれより小さいほぼ円筒形の通路で、長さは細胞壁厚さに対応して早材が晩材より小さい。壁孔膜と壁孔縁の間の空間は一方が中空の 2 枚の平行な円板間隙とみなされ、円板の間隔が数  $\mu\text{m}$ 、通路の長さが  $1 \sim 2 \mu\text{m}$  である。壁孔膜小



孔は壁孔膜のマルゴ部においてほぼ放射および円周方向に走行したマイクロフィブリル束によってできた網目様構造のすき間であり，その形状や大きさは極めて不規則で，TEM写真で見られる大きさは数nmから数 $\mu\text{m}$ に及ぶ。<sup>5)</sup>この通路の長さ，すなわち壁孔膜厚さは約0.1～0.6 $\mu\text{m}$ である。<sup>3)</sup>有縁壁孔対は1仮道管当り数十～百数十個<sup>6),7)</sup>あり，その大部分は仮道管の半径壁のテーパ部に集中し，隣接内こう相互を連結している。

このような直列に連結した仮道管内こうと有縁壁孔対が針葉樹材中の主要な物質流動通路を形成し，これらの大きさや数が木材の浸透や流動に直接関係する。特に，壁孔膜小孔はその径が微小であるために大きな流動抵抗を生じるとともに，種々の流動の非定常性の原因ともなり，物質の流動における支配因子となる。また，有縁壁孔対は木材の乾燥や心材化に際して壁孔膜の移動や変形，壁孔閉鎖等を生じ，有効な通路の大きさや数が変化する。したがって，このような有縁壁孔対の大きさや数および流動に対して果す役割を明らかにすることが，木材中の流体流動の解明において特に重要である。

## 2 流体の流動理論

### 2.1 液体の流動

一本の通直な円筒形毛管中を液体が粘性流動（層流）するとき，流動は次のHagen-Poiseuille式で表わされる。<sup>3),8)～22)</sup>

$$V = \frac{\pi r^4 \Delta P}{8 L \eta} \dots\dots\dots (1-1)$$

ここで， $V$ ：単位時間当りの流動体積 ( $\text{cm}^3/\text{sec}$ )，

$\Delta P$ ：毛管の両端間の圧力差 ( $\text{dyne}/\text{cm}^2 = 0.75 \times 10^{-4} \text{cmHg}$ )，

$r$ ， $L$ ：毛管の半径 (cm) および長さ (cm)，

$\eta$ ：流体の粘性係数 ( $\text{dyne} \cdot \text{sec}/\text{cm}^2 = 0.75 \times 10^{-4} \text{cmHg} \cdot \text{sec}$ )。

したがって、 $r$  および  $L$  の等しい  $N$  個の毛管が並列にある場合、流動は次式で表わされる。

$$V = \frac{N \pi r^4 \Delta P}{8 L \eta} \dots\dots\dots (1-2)$$

また、流動が層流状態であるとき、このような毛管を含む多孔性の試験体中を液体が流動する容易さの尺度として定義される透過性は、次の Darcy 式で表わされる。<sup>3),23)~32)</sup>

$$K = \frac{V L \eta}{A \Delta P} \dots\dots\dots (1-3)$$

ここで、 $K$  : 試験体の透過係数 ( $\text{cm}^2$ ) ,

$A$  : 流動方向に直交する試験体断面積 ( $\text{cm}^2$ )。

(1-2) 式を (1-3) 式に代入するとき次式が得られ、 $K$  は流動する液体の種類にかかわらず試験体固有の値であることがわかる。

$$K = \frac{N \pi r^4}{8 A} = \frac{n \pi r^4}{8} \dots\dots\dots (1-4)$$

ここで、 $n$  : 試験体単位断面積当りの毛管数 ( $\text{cm}^2$ )。

ただし、これらの式は次の定常層流条件が満足されるときに適用できる。すなわち、液体の単位時間当りの流動体積  $V$  が(1)長時間にわたり一定、(2)流動方向の反転で影響を受けない、(3)  $\Delta P$  に比例する、ことである。しかし、木材中の液体の流動実験において時間の経過に伴う  $V$  の低下がしばしば観察され、<sup>11),33)~35)</sup>その原因について種々の説明がなされてきた。この  $V$  の低下現象は基本的には流動実験中における木材内の流動通路、特に有縁壁孔対通路の閉鎖または縮小によるものであり、それらの主要な原因として次の四つが考えられる。(1)木材内に残存している気泡、(2)液体中に混入している固体粒子：気泡発生の核としても働く、(3)圧力低下により液体中の溶解空気から発生した気泡<sup>36)</sup>：流動液体は、直列に連結した径の非常に小さい通路を通過した直後、広い通路で急激な

圧力の低下によって溶解空気が過飽和となり，木材および液体中の疎水性物質を核として気泡を形成する。この頻度は液体の溶解空気量，核の有効性および圧力低下の大きさによって決まる，(4)壁孔膜のトーラスの移動<sup>37)~39)</sup>：トーラスに作用する流動液体の圧力によってマルゴのマイクロフィブリル束が時間依存性の伸び（クリープひずみ）を生じてトーラスが移動し，これと壁孔縁の間の通路が経時的に縮小する。したがって，以上の原因を排除したり，最小にすることによって一定の $V$ が得られると考えられる。また，木材の場合 $V$ が方向の反転で変化したり，<sup>23),34),40)</sup>  $\Delta P$ と比例しない<sup>23),29),33),38)</sup>現象が観察されてきた。これらも $V$ の経時的な低下を引き起こす上記四つの原因によって生ずると考えられる。さらに，液体の流速が増大すると乱流が発生し， $V$ が $\Delta P$ と比例関係とならない原因となる。

## 2.2 気体の流動

円筒形毛管中を気体が流動するとき，その圧縮性および温度によって気体の密度が変化するため，試験体内の気体にかかる圧力および温度によって流動体積が変化する。これを考慮するとき，気体の粘性流動を表わすHagen-Poiseuille式は次式となる。<sup>3),11)</sup>

$$\frac{V p T}{\bar{p} T'} = \frac{N \pi r^4 \Delta P}{8 L \eta} \dots\dots\dots (1-5)$$

ここで， $\bar{p}$ ， $T$ ：試験体内の気体の平均圧力（ $\text{dyne}/\text{cm}^2 = 0.75 \times 10^{-4}$  cmHg）および絶対温度（°K），

$p$ ， $T'$ ：流動体積 $V$ を求めた系の圧力（ $\text{dyne}/\text{cm}^2 = 0.75 \times 10^{-4}$  cmHg）および絶対温度（°K）。

しかし，気体の場合粘性流動のほかに，次のKnudsen式で表わされる気体分子と毛管壁との衝突による分子流（slip flow）が生ずる。<sup>32),41)~43)</sup>

$$\frac{V' T}{T'} = \frac{4}{3} N r \sqrt{\frac{2 \pi R T}{M}} \frac{r^3 \Delta P}{L p} \dots\dots\dots (1-6)$$

ここで、 $V'$ ：分子流による単位時間当り流動体積（ $\text{cm}^3/\text{sec}$ ），

$r$ ：気体の種類と毛管壁表面の性質に依存する定数（ $\doteq 0.9$ ），

$R$ ：気体定数，

$M$ ：気体分子の分子量。

次式で表わされる気体分子の平均自由行程  $\lambda$ （ $\text{cm}$ ）<sup>44)</sup>と毛管径  $r$  が近いオーダーのとき，粘性流動に分子流が加わることになる。

$$\lambda = \frac{\eta}{\bar{p}} \sqrt{\frac{\pi R T}{2 M}} \dots\dots\dots (1-7)$$

Adzumi<sup>45)</sup> はこのような条件下での毛管中の気体流動を，粘性流動と分子流を加算する式によって表わした。すなわち，（1-5）式と（1-6）式を加算して次式を得る。<sup>12), 46)~52)</sup>

$$\frac{V p T}{\Delta P T'} = \frac{N \pi r^4}{8 L \eta} \bar{p} + \frac{4}{3} \frac{N r r^3}{L} \sqrt{\frac{2 \pi R T}{M}} \dots\dots\dots (1-8)$$

この式は，温度  $T$  が一定のとき，気体の流動が同一の試験体および気体に対して  $\bar{p}$  の一次関数であり，その直線の傾きが粘性流動項，切片が分子流項を表わすことを示す。したがって，（1-8）式右辺第1項と第2項を比較して， $\lambda$  と  $r$  の関係が  $\lambda / r \gg 3 \pi / 64 r \doteq 0.164$  のとき分子流が， $\lambda / r \ll 0.164$  のとき粘性流動が支配的となり， $\lambda / r \doteq 0.164$  付近では両者がともに重要であることがわかる。（1-7）式で明らかのように， $\lambda$  は  $T$  が一定のとき  $\bar{p}$  の関数であり，同一流動系では  $\bar{p}$  によって  $\lambda / r$  の値が変動して分子流項の重要性が変わる。また，同一の  $\bar{p}$  であっても  $r$  によって分子流の重要性は変わる。

一方，試験体中を気体が流動する容易さの尺度である透過性は次式で表わされる。<sup>40), 53)~56)</sup>

$$K_g = \frac{V L \eta}{A \Delta P} \frac{p}{\bar{p}} \frac{T}{T'} \dots\dots\dots (1-9)$$

ここで、 $K_g$ ：試験体の見掛けの気体透過係数 ( $\text{cm}^2$ )。

$K_g$  は粘性流動と分子流を含む値であるため見掛けの透過係数と定義される。

すなわち、(1-8)式の両辺に  $L \eta / A \bar{p}$  を掛けて整理すると次のKlinkenberg式が得られる。<sup>28), 40), 57)~59)</sup>

$$K_g = K (1 + b / \bar{p}) \dots\dots\dots (1-10)$$

ここで、 $b (= 4 c \lambda \bar{p} / r)$ ：試験体と気体の性質により決まる定数 ( $\text{dyne/cm}^2 = 0.75 \times 10^{-4} \text{ cmHg}$ ),

$c (= 16 r / 3 \pi)$ ：定数。

$K$  は (1-4) 式の  $K$  と同一で、粘性流動のみによる試験体固有の透過係数である。(1-10)式は、 $T$  が一定のとき、 $K_g$  が同一の試験体および気体に対して  $1/\bar{p}$  の一次関数であり、その直線の切片が粘性流動項、傾きが分子流項を表わすことを示す。

多孔体である木材中の流動通路は通直な毛管束ではなく、前述のように針葉樹材の場合、仮道管内こう一壁孔膜小孔の直列な二つの要素から成る通路が主体である。仮道管内こうの半径は平均約  $10 \mu\text{m}$ <sup>4)</sup>、壁孔膜小孔の平均半径は約  $0.1 \mu\text{m}$ <sup>8)</sup> と言われている。これらの通路では  $30^\circ\text{C}$ 、1気圧の空気の場合  $\lambda/r$  はそれぞれ 0.007、0.68 となり、両通路特に壁孔膜小孔において分子流は無視できない。この結果、木材中の気体の流動では粘性流動と分子流が生じ、 $T$  が一定のとき  $V p T / \Delta P T'$  が  $\bar{p}$  と一次関係 ((1-8)式) となり、さらに  $K_g$  が  $1/\bar{p}$  と一次関係 ((1-10)式) となる。

また、気体は温度  $T$  により粘性係数  $\eta$ 、平均自由行程  $\lambda$  等の値が変化するため、流動が  $T$  によって影響を受ける。すなわち、気体の分子運動論から導びかれた結果<sup>44)</sup>として  $\eta$  が圧力に無関係で  $\sqrt{T}$  に比例することから、(1-8)式右辺第1項が  $\eta$  を含むので  $1/\sqrt{T}$  に、また第2項が  $\sqrt{T}$  にそれぞれ比例する

結果， $V_p T / \Delta P T'$  は  $\bar{p}$  が一定のとき  $\sqrt{T}$  に関して粘性流動項を表わす双曲線と，分子流項を表わす直線との和で表わされることになる。また，(1-7)式で  $\lambda$  が  $\eta$  を含むために  $T$  に比例し，したがって(1-10)式の  $b$  が  $T$  に比例する結果， $K_g$  は  $\bar{p}$  が一定のとき  $T$  に関して一次関係となる。

## 2.3 乱流

毛管中での流体の流速  $v$  (cm/sec) が大きくなると，層流から乱流への流動状態の移行が起こる。層流状態では流体の各層は整然と並んで流れているが，乱流状態になると各流体微粒子が前後左右に自由に運動し，それによる圧力損失が生じて流速が低下する。層流においては圧力低下  $\Delta P$  は  $v$  に比例するが，乱流になると  $\Delta P$  はだいたい  $v^{1.75}$  に比例するとされている。<sup>9)</sup> その結果，乱流が生ずると層流状態における液体および気体の流動を表わす(1-2)および(1-8)式の関係は成り立たなくなる。この流動状態の移行の指標として Reynolds 数  $R_e$  が定義される。<sup>8), 9), 60)</sup>

$$R_e = \frac{2 v r \rho}{\eta} \dots\dots\dots (1-11)$$

ここで， $v$  : 流体の線速度 (cm/sec)，

$\rho$  : 流体の密度 ( $\text{g/cm}^3$ )。

この式は， $R_e$  が  $v$  だけでなく，毛管の大きさや流体の性質に関係することを示す。いま，流体の性質として  $\eta / \rho$  で表わされる動粘性係数  $\nu$  ( $\text{cm}^2/\text{sec}$ ) を定義すると， $30^\circ\text{C}$ ，1気圧の空気および水に対してそれぞれ  $\nu = 0.16$ ， $0.01 \text{ cm}^2/\text{sec}$  となり， $r$  が既知であれば  $v$  を求めることにより  $R_e$  の算出が可能である。通直な円筒形毛管の場合  $R_e = 2200$ ，屈曲した毛管やオリフィス状の毛管ではこれより低い  $R_e$  で層流から乱流への移行が起こるとされている。<sup>61)</sup> 木材の場合種々の大きさの通路が並列，直列に複雑に組み合わさっており，円筒形毛管の場合より低い  $R_e$  で乱流が生ずると考えられるが， $r$  が均一でないために  $v$  を求めることが極めて困難で，その結果  $R_e$  の算出が困難で

ある。しかし， $v$ は流動体積に比例する。また，液体の場合 $\rho$ および $\eta$ は圧力にはほぼ無関係で $T$ に依存し，気体の場合 $\rho (= \bar{p} M / R T)$ は $\bar{p} / T$ に， $\eta$ は圧力に無関係で $\sqrt{T}$ にそれぞれ比例する。したがって， $R_e$ は，温度が一定のとき同一の試験体および流体について，液体の場合流動体積に，気体の場合流動体積と $\bar{p}$ の積に比例することになり，これらを考慮すれば $R_e$ の評価がある程度可能である。

### 3 既往の研究

針葉樹材では仮道管内こう一有縁壁孔対の直列な二つの要素が主要な流動通路を形成する。特に，内こうに比較して2～3桁径の小さい壁孔膜小孔が流動に対して大きな抵抗を生じ，この大きさや数が木材の浸透や流動を支配することとなる。そこで，壁孔膜小孔の定量的な評価が湿潤材や乾燥材について，次のような種々の流体の流動実験によってなされ，有効孔径や孔数が得られてきた。<sup>2)</sup> (a)水の流動と電気浸透，(b)気体と液体の流動，(c)気体の流動，(d)湿潤空気の流動，(e)径既知の粒子懸たく液の流動，(f)気-液または液-液メニスカスを押し出すのに要する圧力の測定。これらの測定法は木材中の流動通路を次のいずれかに仮定している。すなわち，(1)壁孔膜小孔のみが流動抵抗を持つ1要素モデル，(2)壁孔膜小孔と仮道管内こうの直列2要素モデル，(3)壁孔膜小孔，壁孔室または壁孔口，および仮道管内こうの直列3要素モデル。さらに，上記の各方法はこのようなモデル化のほか，通路の形状や長さ等に種々の単純化をはかっており，これらの妥当性が問題となることが多い。本節では，これらの各測定法とそれによって得られた結果およびそれらの問題点について論述する。

(a) 水の流動と電気浸透実験による評価

Stamm<sup>18), 21), 22)</sup>は飽水木材木口試験体と孔径および長さの検量された1本の通直なガラス毛管を直列に接続し，水を流動させたときのそれぞれにおける

両端間圧力差を測定した。この際、木材試験体に対するガラス毛管の圧力差の比は適用圧力の増加に伴って直線的に減少した。彼はこれを乱流によるとし、この直線を適用圧力 0 に外挿して層流状態における圧力差比を得た。そして、ガラス毛管に対して (1-1) 式、木材試験体に対して (1-2) 式を適用し、直列であるのでこれらの通路における流動体積と液体の粘性係数が等しいことから、木材試験体の流動通路の平均半径を求める次式を導いた。

$$r = \sqrt{\frac{\pi r_0^4 L \Delta P_0}{q L_0 \Delta P}} \dots\dots\dots (1-12)$$

ここで、 $r_0$ 、 $L_0$ 、 $\Delta P_0$  : ガラス毛管の半径 (cm)、長さ (cm)、両端間圧力差 (dyne/cm<sup>2</sup>)、

$r$ 、 $L$ 、 $q$ 、 $\Delta P$  : 木材試験体の通路の平均半径 (cm)、有効長さ (cm)、有効断面積 (cm<sup>2</sup>)、両端間圧力差 (dyne/cm<sup>2</sup>)。

仮道管長より薄い試験体では  $L$  を試験体厚さとし、最大仮道管長以上の厚さの試験体では流動抵抗がすべて壁孔膜小孔にあると仮定して、 $L$  を直列にある壁

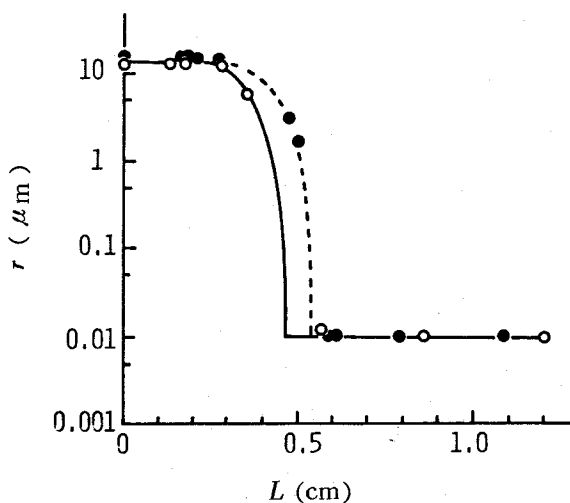


図 1-1 流動通路の平均半径 ( $r$ ) と試験体厚さ ( $L$ ) の関係<sup>21)</sup>

- : アラスカシーダー心材,
- : ウェスタンレッドシーダー心材



孔膜の厚さの総和とした。そして、水を用いた電気浸透により  $q$  を求めた。こうして得たアラスカシーダーとウェスタンレッドシーダーにおける平均半径と試験体厚さの関係を図 1-1 に示す。半径約  $10 \sim 11 \mu\text{m}$  の直線部は仮道管内この平均半径を表わし、試験体厚さが最大仮道管長に近付くにしたがって  $r$  は急激に低下し、約  $0.01 \mu\text{m}$  の直線部は壁孔膜小孔の平均半径を表わす。しかし、この測定法は(1)水を用いた電気浸透測定では、流動にはほとんど寄与しない細胞壁中の毛管も流動に有効な断面積として評価される、(2)木材中の液体流動で問題となる経時的な流動体積の低下に対して、便宜的に低下後はば一定となったときを定常状態とみなしている、ことなどが問題である。

#### (b) 気体と液体の流動実験による評価

気体の流動では分子の平均自由行程が毛管径に比べて極めて大きいとき、気体分子と毛管壁との衝突による分子流が支配的となることを第 2 節に述べた。Petty と Preston<sup>41)</sup> は木材試験体中に非膨潤液体 ( $n$ -ヘキサン) と気体 (乾燥空気) をそれぞれ流動させた。そして、液体流動に対しては、壁孔膜小孔のような半径が長さより大きい通路の出入口における末端効果<sup>62)</sup>を考慮して、(1-2) 式の長さ  $L$  を  $L + \alpha r$  ( $\alpha$ : 毛管の半径と長さの比で異なる定数) とするクエット補正を行なった Hagen-Poiseuille 式を適用した。また、気体流動に対しては同様の考慮から、(1-6) 式 (ただし、温度に対して未補正) の  $8r/3L$  を  $\{1 + (3L/8r)\}^{-1}$  とするクロージング補正を行ない、 $r=1$  とした Knudsen 式を適用した。すなわち、液体と気体流動に対して、それぞれ次式を適用した。

$$V = \frac{N \pi r^4 \Delta P}{8 \eta (L + \alpha r)} \quad \dots\dots\dots (1-13)$$

$$V' = \frac{N \pi r^2 \Delta P}{\sqrt{2 \pi \rho_0}} \cdot \frac{1}{1 + 3L/8r} \quad \dots\dots\dots (1-14)$$

ここで、 $\alpha = 1.146$ ,

$\rho_0$ : 実験温度、単位圧力における気体の密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )。

表 1-1 有縁壁孔膜小孔の平均半径 ( $r$ ) と 1 仮道管当り小孔数 ( $m$ ) (ほぼ全乾状態)

樹 種	乾燥方法	$r$ ( $\mu\text{m}$ )	$m$ (個)	測定法
グランドファー				
辺 材	炬乾燥	0.12	600	c-4
"	"	0.26	110	c-5
"	溶媒置換乾燥	0.09	27000	c-4
"	"	0.16	12000	c-5
ダグラスファー				
辺 材	炬乾燥	1.1	0.53	b
心 材	"	0.77	0.27	b
イースタンヘムロック				
辺 材	炬乾燥	0.605		c-2
"	"	0.968		c-2
心 材	"	0.436		c-2
"	"	0.715		c-2
シトカスプルース				
辺 材	炬乾燥	0.14	250	c-3
"	"	0.36	35	c-5
"	"	0.85	0.61	b
"	"	0.5		c-6
心 材	"	0.23	0.98	b
ホワイトスプルース				
辺 材	炬乾燥			
	0.32cm厚	0.91	15700 <sup>1)</sup>	c-1
	1cm厚	1.27	2300 <sup>1)</sup>	c-1
	2cm厚	1.76	260 <sup>1)</sup>	c-1
心 材	炬乾燥			
	0.32cm厚	2.16	280 <sup>1)</sup>	c-1
	1cm厚	2.52	<1 <sup>1)</sup>	c-1
カラマツ				
辺 材	炬乾燥	2.3	0.17	b
心 材	"	0.39	0.51	b
ウェスタンレッドシーダー				
辺 材	炬乾燥	0.51	4.6	b
心 材	"	0.20	2.4	b
スコッチパイン				
辺 材	臨界点乾燥	0.76	77	c-7
"	溶媒置換乾燥	0.53	81	c-7

1) 壁孔膜単位厚さ当りの値

そして、流動抵抗がすべて壁孔膜小孔にあると仮定して長さ  $L$  を壁孔膜厚さ (  $0.15 \mu\text{m}$  と仮定 ) とし、上の両式により小孔の平均半径と有効孔数を求めた。その結果を表 1-1 ( 測定法 b の欄 ) に示す。1 仮道管当りの壁孔膜小孔数が非常に小さいが、これはすべての仮道管が流動に有効であるとして小孔数を算出していることによるほか、測定法そのものに (1) 試験体の液体による飽和が不十分で定常流動状態が得られていない、(2) 小孔以外の流動抵抗を無視している、などの問題点を含むことによると考えられる。

### (c) 気体の流動実験による評価

気体の流動では、分子の平均自由行程が毛管径に近い場合粘性流動と分子流がともに重要となり、Adzumi 式 ( ( 1-8 ) 式 ) で表わされることを第 2 節に述べた。( 1-8 ) 式で、毛管の大きさと数に関係する定数として  $E (=Nr^4/L)$ 、 $F (=Nr^3/L)$  を定義すると、 $Vp/\Delta P - \bar{p}$  の直線の傾きと切片から  $E$ 、 $F$  が求められ、さらに次式により毛管の平均半径  $r$  と、長さ  $L$  が既知であれば孔数  $N$  が得られる。

$$r = \frac{E}{F}, \quad \frac{N}{L} = \frac{F^4}{E^3} \quad \dots\dots\dots (1-15)$$

また、気体流動を気体透過係数  $K_g$  を用いて表わした Klinkenberg 式 ( ( 1-10 ) 式 ) で、 $K_g - 1/\bar{p}$  の直線の傾きと切片から次式により毛管の平均半径  $r$  が得られる。

$$r = 4 c \lambda \bar{p} \frac{\text{切片}}{\text{傾き}} \quad \dots\dots\dots (1-16)$$

Sebastian ら<sup>46)</sup> はホワイトスプルス辺材および心材木口試験体中の酸素ガスの流動実験において、 $Vp/\Delta P$  と  $\bar{p}$  の間に直線関係を得た。そして、流動抵抗がすべて壁孔膜小孔にあると仮定して ( 1-15 ) 式により小孔の平均半径と小孔数を得ている ( 表 1-1, 測定法 c-1 の欄 )。この測定法は、仮道管内この流動抵抗を無視し、木材中の流動通路を直列複数の壁孔膜小孔から

成る径の等しい毛管束とみなしているものである。

Comstock<sup>40)</sup> は平均自由行程  $\lambda$  の異なる窒素ガス (25°C, 1 気圧で  $\lambda = 0.065 \mu\text{m}$ ) とヘリウムガス ( $\lambda = 0.191 \mu\text{m}$ ) を用いてイースタンヘムロック辺材および心材木口試験体中の流動実験を行なった。そして、 $K_g$  と  $1/\bar{p}$  の間に直線関係を得、その傾きと切片から (1-16) 式により壁孔膜小孔の平均半径を得ている (測定法 c-2 の欄)。結果において平均半径はヘリウムガスの場合に大となったが、この差の原因として彼は壁孔膜小孔を円筒形毛管と仮定したことおよび  $\lambda$  の値のあいまいさを挙げている。

一方、Petty<sup>47)</sup> はシトカスプルス辺材木口試験体中の乾燥空気の流動実験において、 $V/\Delta P$  と  $\bar{p}$  の関係が低圧部で直線からずれる実験結果を得た。これについて彼は、このずれが木材中の流動通路が均一でないことによるとして前述の直列 2 要素モデルを仮定した。すなわち、各要素における流動に対しては  $V/\Delta P$  と  $\bar{p}$  の間に直線関係が成り立つとして、これら 2 要素の流動式を組み合わせて木材に対する流動式を誘導した。そして、実験曲線から各要素における直線の傾きと切片を算出した。さらに、仮道管内こうに対しては温度に対する補正を考慮しない (1-8) 式を、壁孔膜小孔に対しては第 2 項の  $8r/3L$  をクロージング・ファクター  $K_c = \{1 + (L/2r)\}^{-1}$  に置き換えた同様の (1-8) 式を適用し、それぞれの要素の平均半径と孔数を得ている (測定法 c-3 の欄)。

同様の方法で Petty と Puritch<sup>48)</sup> は、グランドファー辺材木口試験体中の乾燥空気の流動実験により壁孔膜小孔の平均半径と孔数を得ている (測定法 c-4 の欄)。結果において、炉乾燥試験体が溶媒置換乾燥試験体より小孔数が小さいのは乾燥の際の壁孔閉鎖によると考えられる。

その後 Petty<sup>49)</sup> は、壁孔膜小孔のような孔径と長さがほぼ同じオーダーである毛管では (1-8) 式第 2 項にクロージング・ファクター  $K_c$  を適用するばかりでなく、第 1 項の長さ  $L$  を  $L + 3\pi r/8$  とするクエット補正を適用する必要があるとし、この考えの式で Petty<sup>47)</sup> および Petty と Puritch<sup>48)</sup> のデ

ータを再計算した（測定法 c - 5 の欄）。その結果，平均半径および孔数がやや異なる値が得られている。

以上の一連の Petty の測定法は，木材中の流動通路を仮道管内こうと壁孔膜小孔の直列 2 要素にモデル化したものである。これに対して，3 要素のモデル化を試みたものがある。例えば，Bolton と Petty<sup>12)</sup> は炉乾燥シトカスプルス辺材木口試験体中の乾燥空気の流動実験において得られた  $Vp/\Delta P - \bar{p}$  の関係曲線を，前述の直列 3 要素に解析して Petty<sup>49)</sup> に準じた方法で各要素の平均半径を得ている（測定法 c - 6 の欄）。

さらに Bolton と Pett<sup>50)</sup> はスコッチパイン辺材木口試験体を臨界点乾燥した後，およびそれを n - オクタンで飽和し真空乾燥した後，それぞれ乾燥空気の流動実験を行ない，同様の方法で各要素の平均半径と孔数を得ている（測定法 c - 7 の欄）。彼らは，臨界点乾燥後と溶媒乾燥後で値が異なるのは溶媒乾燥の際の壁孔膜の移動によるとした。これら一連の測定法は，壁孔膜小孔以外の流動抵抗を考慮していることは評価できるが，小孔を円筒形毛管と仮定していること，流動体積測定の際の誤差が結果に大きな影響を与え得ること，などが問題である。

#### (d) 湿潤空気の流動実験による評価

Stamm<sup>21), 63)</sup> は木材試験体と孔径および長さの検量されたガラス毛管を直列に接続し，種々の相対蒸気圧を持つ湿潤空気の流動実験を行ない，その際のそれぞれの通路における両端間圧力差を測定した。そして，ガラス毛管には (1-1) 式，木材試験体には (1-2) 式を適用し，これらの通路における流動体積と流体の粘性係数が等しいとして次式を導いた。

$$\frac{N r^4}{L} = \frac{r_0^4}{L_0} \frac{\Delta P_0}{\Delta P} \dots\dots\dots (1-17)$$

この式から，圧力差比の平方根  $\sqrt{\Delta P_0/\Delta P}$  が木材試験体中の通路の有効断面積に比例するとして，これを流動空気の相対蒸気圧に対応する木材含水率に対して図示した。その結果， $\sqrt{\Delta P_0/\Delta P}$  が，含水率の増加に伴って直線的に減

少した後，含水率 20 % 以上で急激に減少する曲線が得られた。彼は，この急激な減少は壁孔膜小孔に水が凝結して有効通路数が減少し，木材試験体の流動抵抗が増大したためであるとした。そこで，空気の相対蒸気圧から Kelvin 式を用いて計算した水の凝結半径に対して，凝結によって閉鎖された通路における流動体積の微分値を図示し，図 1 - 2 に示す壁孔膜小孔径分布曲線を得てい

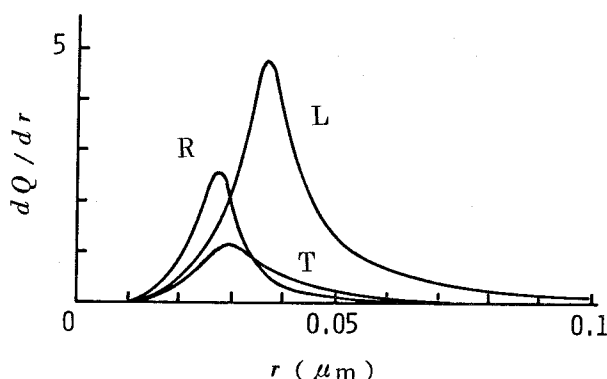


図 1 - 2 流動体積に基づく壁孔膜の細孔分布<sup>21)</sup>

(ウェスタンホワイトパイン心材)

L, R, T : 長軸, 半径, 接線方向流動実験による値,

縦軸は L :  $\times 10^{-2}$ , R :  $\times 10^{-4}$ , T :  $\times 10^{-5}$

る。ウェスタンホワイトパイン心材における最頻半径は，長軸，半径，接線方向流動の場合でそれぞれ 0.0365，0.0275，0.0290  $\mu\text{m}$ であった。ただし，この分布曲線は壁孔膜小孔の数に基づく分布ではなく，流動体積の分布である。しかも，この測定法は気体（湿潤空気）の流動に対して，試験体内の平均圧力による流動体積の変動を考慮せず液体に対する Hagen-Poiseuille 式を適用しており，問題がある。

(e) 径既知の粒子懸たく液の流動実験による評価

木材実質に吸着しない粒子の懸たく液を木材試験体中に流動させるとき，通路の孔径よりも大きい粒子は通路を物理的に閉鎖し，<sup>64)~66)</sup> それに対応して流動

体積が低下する。Megraw<sup>67)</sup> は、ほぼ球形で粒径が単分散で既知である数種の粒子の懸たく液を用い、一定の試験体両端間圧力差の下で測定した各粒径における流動体積の割合から、壁孔膜小孔径の分布を求めている。シトカスプルス心材では半径  $0.0045\mu\text{m}$  以下が 3%,  $0.0045 \sim 0.0235\mu\text{m}$  が 21.5%,  $0.0235 \sim 0.0375\mu\text{m}$  が 26.8%,  $0.0375\mu\text{m}$  以上が 48.7% であり、ホワイトスプルス辺材では半径  $0.0235\mu\text{m}$  以下が 10.5%,  $0.0235 \sim 0.0375\mu\text{m}$  が 9.5%,  $0.0375\mu\text{m}$  以上が 80% であった。ただし、この分布は数に基づくものではなく、流動体積の分布である。

(f) 気-液または液-液メニスカスを押し出すのに要する圧力による評価  
円筒形毛管を満たしている液体をその界面張力に抗して、その液体と溶解しない空気または他の液体に置換するのに必要な圧力  $P_e$  (dyne/cm<sup>2</sup>) は、次式により決定される。<sup>18), 21), 22), 68) ~ 73)</sup>

$$P_e = \frac{2\sigma_e}{r} \cos \theta_e \quad \dots\dots\dots (1-18)$$

ここで、 $\sigma_e$  : 満たした液体と置換空気または液体との界面張力 (dyne/cm<sup>2</sup>),

$\theta_e$  : 気-液または液-液メニスカスの毛管壁に対する接触角。

半径の異なる毛管が並列に接続した通路における  $P_e$  とは、通路の一端から圧力を徐々に増加させながら加えたとき、メニスカスが最大孔径の通路を通して他端から最初の気泡または液滴として出るのに要する圧力であり、直列に接続した通路のそれは最小孔径の通路に対する圧力である。また、圧力  $P_e$  を加えて並列における最大の通路で最初のメニスカス置換が起こった後、さらに圧力を増大するとその圧力に対応したやや孔径の小さい通路でも置換が起こり、置換空気または液体が流動する。このように、通路にかけた圧力の増加に対応して流動が増大するので、(1-18) 式で置換圧力  $P_e$  から求められる通路半径に対して流動体積の微分値を図示すると、通路半径の分布曲線が得られることになる (図 1-3)。<sup>21), 68)</sup>

Stamm<sup>18), 21)</sup> は飽水木材木口試験体の空気置換で通路の最大半径 (図 1-4)

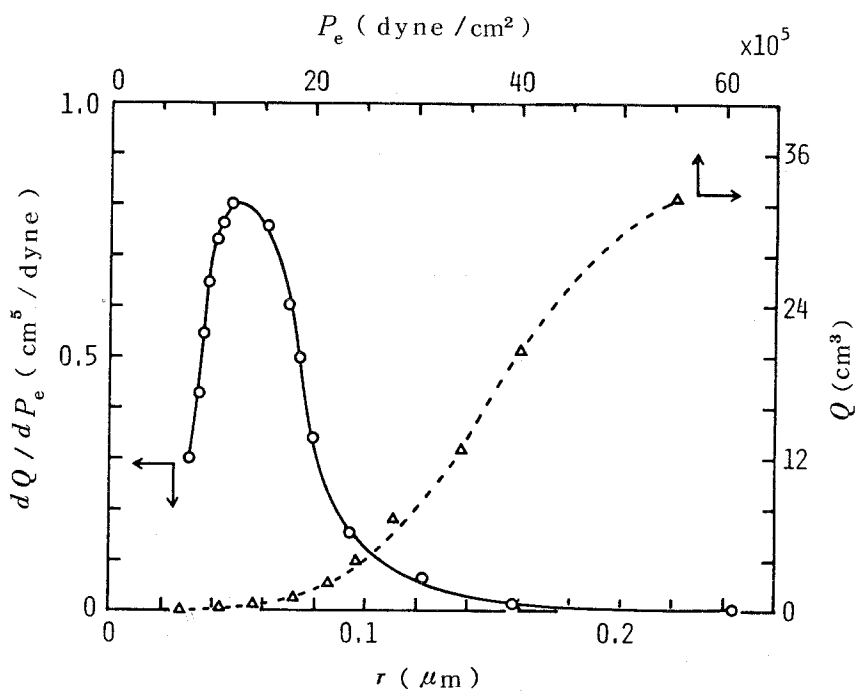


図 1 - 3 流動体積 ( $Q$ ) と置換圧力 ( $P_e$ ) の関係および流動体積に基づく壁孔膜の細孔分布 ( $dQ/dP_e - r$ )<sup>69)</sup>  
(シトカスプルス心材)

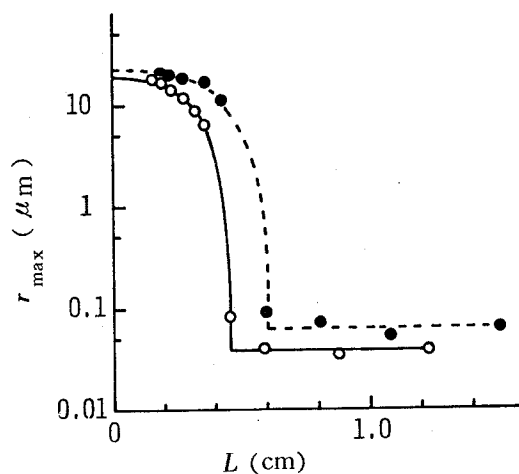


図 1 - 4 流動通路の最大半径 ( $r_{\max}$ ) と試験体厚さ ( $L$ ) の関係<sup>21)</sup>  
(飽水木口試験体の空気置換)

○ : アラスカシーダー心材,  
● : ウェスタンレッドシーダー心材



を, StammとWagner<sup>21),68)</sup> はオクチルアルコール置換で最大半径と最頻半径 (図1-5)を得ている。図1-4で, 最大半径約  $11 \mu\text{m}$  となる外挿値は仮

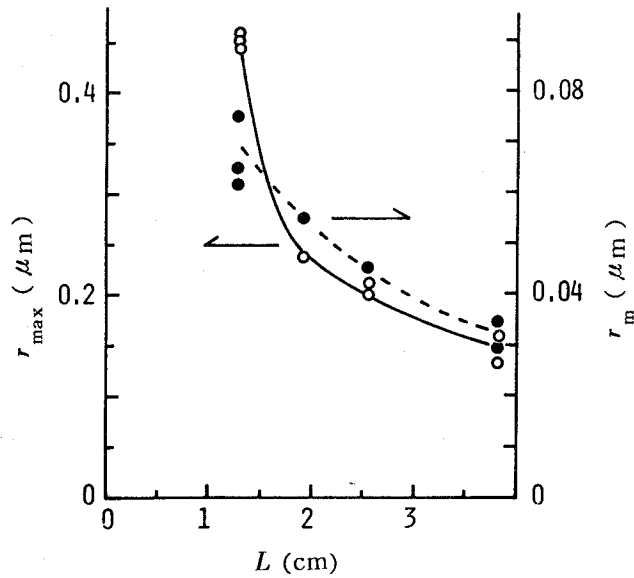


図1-5 流動通路の最大半径( $r_{\max}$ ) (実線) および最頻半径 ( $r_m$ ) (点線) と試験体厚さ( $L$ ) の関係<sup>69)</sup> (シトカスプルー ス心材飽水木口試験体のオクチルアルコール置換)

道管内こうに対する値であり, 最大仮道管長より厚い試験体について得られた 壁孔膜小孔の最大半径はアラスカシーダー心材が  $0.032 \sim 0.052 \mu\text{m}$ , ウェスタンレッドシーダー心材が  $0.046 \sim 0.069 \mu\text{m}$ であった。また, 図1-5で, 試験体厚さの増加に伴い最大半径と最頻半径が減少するのは, 厚さの増加に伴って直列に通る壁孔数が増加し, そのために大きな小孔に出会う確率が小さくなるためであると説明している。しかし, 通路が直列, 並列に複雑に組み合わされている木材の場合, この測定法における最大半径の物理的な意味は不明確である。

以上のように, 針葉樹材中の主要な流動通路である壁孔膜小孔の定量的な評価が種々の方法によってなされてきた。しかし, これらの測定法は(1)仮道管内

この流動抵抗を無視するなど通路にモデル化を行なっている，(2)壁孔膜小孔の形状等の単純化をはかっている，(3)平均半径と孔数や最大半径といった一つの等価値で評価している，(4)分布を数でなく流動体積に基づいて評価している。また，実験方法そのものにも各方法で述べたような種々の問題点を含む場合が多く，得られている結果が壁孔膜小孔を正しく評価しているかどうか疑問がある。このような流動実験によって壁孔膜小孔の大きさを定量評価するには，定常流動系を確立し，このもとでどの大きさの壁孔膜小孔がどれだけ存在するかを示す数に基づく孔径分布を得る必要がある。

#### 4 本研究の目的と意義

針葉樹材中の流動通路は仮道管内こうと壁孔膜小孔の直列のものが主体である。壁孔膜小孔は仮道管内こうに連結して通路のネック部であることによって，気泡発生の原因となる液体の圧力の急激な変化を引き起こし，発生した気泡や液体に含まれる固体粒子等が引掛かって流動体積を経時的に低下させ，液体および気体流動において流線の乱れを引き起こし乱流を発生させやすくする等，流動の非定常性の発生原因となる。定常流動状態は木材中の流動の解明や通路の定量化に必須な条件である。本研究ではまず，このような流動の非定常性と壁孔膜小孔との関連を明らかにするために，木材木口試験体について種々の条件下で水および乾燥空気の流動実験を行なった。そして，この結果から定常流動状態を得るための実験条件を検討した。第2章でこれらの結果を論述する。

さらに，Petty<sup>47)</sup>により壁孔膜小孔の流動抵抗が全抵抗の約91%と計算されているように，壁孔膜小孔は仮道管内こうに比べて径が微小であるために大きな流動抵抗を生じ，流動の支配因子となる。このように流動をほぼ支配する壁孔膜小孔の定量化が種々の流動実験によってなされてきた。しかし，これらの方法は(1)定常流動状態が得られていない等実験法そのものに問題がある，

(2)仮道管内この抵抗を無視する，壁孔膜小孔の形状を円筒形と仮定する等種々の仮定や単純化を行なっている，(3)広い範囲の分布を持つ壁孔膜小孔の大きさを平均半径，最大半径等の一つの等価値で評価している，など問題点を含む場合が多い。本研究では，壁孔膜のレプリカ像のTEM写真を画像解析法により解析し，壁孔膜小孔の形状，大きさ，数等を測定して壁孔膜小孔の定量評価を行なった。この方法は壁孔膜小孔をより直接的に，しかも分布として評価するものである。さらに，壁孔膜小孔がこのような分布を持つときどのような流動体積の分布を示すかを明らかにするために，定常流動状態において粒径が均一な数種の球形粒子懸濁液の流動実験を行ない，各粒径における流動体積から，Hagen-Poiseuille式を仮定して誘導した流動式により流動体積分布，そして壁孔膜小孔径分布を算出した。この方法は壁孔膜小孔の内接円の直径の分布を求めるものである。そして，これらの結果と画像解析法による結果を対比して，木材中の流体の流動における壁孔膜小孔の寄与を検討した。第3章でこれらの結果を論述する。

本論文は，これらの検討により木材中の流体流動における壁孔膜小孔の役割を明らかにしようとするものである。

## 第2章 木材中の流動に対する阻害要因としての 壁孔膜小孔

針葉樹材中の流動通路は仮道管内こうと壁孔膜小孔の直列のものが主体である。特に、壁孔膜小孔は仮道管内こうに比べて大きさが2～3桁小さいために大きな流動抵抗を生じて流動の支配因子となるばかりでなく、液体流動における流動体積の経時的な低下、気体流動における分子流、さらには乱流の発生等の流動の非定常性の原因となる。例えば、Kelsoら<sup>36)</sup>は木材中の水の流動で、発生した気泡が木材内の通路を閉鎖することが流動体積の低下の原因の一つであることを明らかにしている。またWileyら<sup>61)</sup>は気体の流動において、乱流は比較的通路の均一な砂岩では高圧力差まで見られないが、木材では発生しやすいことを明らかにしている。

本章では、木材中の流動と壁孔膜小孔との関連を明らかにするために、蒸留水および乾燥空気の流動実験を行ない、液体流動体積の経時的な低下の原因、気体流動における分子流および乱流の発生を検討した結果を論述する。

### 1 定常流動阻害要因としての壁孔膜小孔<sup>74)</sup>

木材中の液体流動において、しばしば時間の経過に伴う流動体積 $V$ の低下が観察されてきた。その原因として有縁壁孔対の通路の閉鎖または縮小に関する四つの要因が考えられることを前章で述べた。すなわち、(1)木材内に残存している気泡、(2)液体中に混入している固体粒子、(3)圧力低下によって液体中の溶解空気から発生した気泡、(4)壁孔膜のトールズの移動、である。また、これらの原因によりさらに、 $V$ が流動方向の反転で影響を受けたり、あるいは $\Delta P$ と比例しないなど、定常層流に関するいわゆる三つの条件が満足されないことを

述べた。そこでまず、壁孔の通路の閉鎖または縮小に関する前述の四つの原因について検討し、定常層流に対する壁孔膜小孔の阻害機能を明らかにする。このために、針葉樹材中の流動通路に対するモデル化の意義を持つグラスフィルター模型および未乾燥ヒノキ辺材を用いて、ろ過条件および溶解空気量の異なる蒸留水の流動実験を行なった。本節ではその結果を論述する。ここで、未乾燥材とは伐採直後から一度も乾燥されず水中に浸せきし、デヒドロ酢酸ナトリウムの添加によって防腐保存された材であり、少なくとも辺材の大部分の壁孔が閉鎖していないものと考えられる。

## 1.1 実験材料および方法

### 1.1.1 供試材料

供試材料には、グラスフィルター（GF）模型および京都大学芦生演習林産のヒノキ辺材を用いた。

GF模型には、板径約14mm、厚さ約1mmで、仮道管内こう径とほぼ等しい大きさの孔径20～30 $\mu$ mの毛管を持つグラスフィルターNo.3、および壁孔膜小孔径とほぼ等しいオーダーの大きさと考えられる孔径 $0.22 \pm 0.02 \mu$ mのミリポア・メンブランフィルターGSを用い、次の3種のものを作製し供試した。(1)GF模型A：グラスフィルターNo.3を内径約14mm、長さ約10mmのガラス管中に溶融装着した模型、(2)GF模型B<sub>1</sub>：GF模型Aの流動実験の際の高圧側にグラスフィルターに接してメンブランフィルターGSをアラルダイトで接着した模型、(3)GF模型B<sub>2</sub>：GF模型Aの高圧、低圧両側にグラスフィルターに接してメンブランフィルターを同様に接着した模型。GF模型Aは仮道管内こう通路に、模型B<sub>1</sub>は壁孔膜小孔－仮道管内こうの直列通路に、模型B<sub>2</sub>は壁孔膜小孔－仮道管内こう－壁孔膜小孔の直列通路にそれぞれ孔径において対応するものとみなされる。

供試ヒノキ辺材は容積密度0.35g/cm<sup>3</sup>、平均年輪幅0.21cm、平均仮道管長3.3mm(最大4.0mm、最小2.7mm)であった。これより直径約15mmで、流

動通路に壁孔を含む確率が異なる次の3段階の厚さの円板状木口試験体を作製した。(1)木材試験体A：最大仮道管長に等しい厚さ4mm,(2)木材試験体B：平均仮道管長よりやや短い厚さ3mm,(3)木材試験体C：最小仮道管長より短い厚さ2mm。これらを実験直前まで強力な防腐剤であるデヒドロ酢酸ナトリウム0.2%水溶液中に浸せき保存した。

流動実験に先立ち、GF模型および木材試験体を流動液体に浸せきし、明らかに流動を障害すると考えられる内部の残存気泡を除去するために、減圧あるいは煮沸による脱気処理を行なった。

### 1.1.2 流動液体

流動液体には蒸留水を用い、実験に先立ち、混入している固体粒子を次のように除去した3種の液体を用いた。(1)グラスフィルターNo.4(孔径5~10 $\mu\text{m}$ )によるろ過(GFろ過),(2)ザートリウス・メンブランフィルターSM11308(孔径0.15 $\mu\text{m}$ )によるろ過(0.15MFろ過),(3)ザートリウ

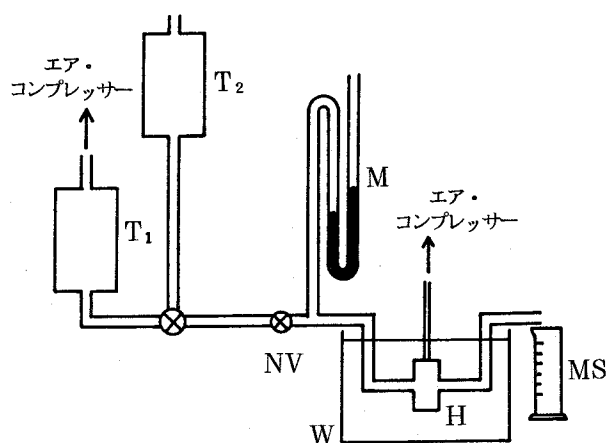


図2-1 実験装置

T<sub>1</sub>：加圧法用貯水槽， T<sub>2</sub>：水頭法用貯水槽，  
NV：ニードルバルブ， M：水銀マンノメーター，  
H：試験体保持セル， MS：メスシリンダー，  
W：恒温水槽

ス・メンブランフィルター S M 11311 ( 孔径  $0.01\ \mu\text{m}$  ) によるろ過 (  $0.01\ \text{MF}$  ろ過 )。

### 1.1.3 実験装置および方法

用いた実験装置を図 2 - 1 に示す。エア・コンプレッサーからの圧力により水を流動させる加圧法と，水柱の重力により流動させる水頭法の両法が適用できるようにこの装置を設計した。貯水槽 (  $T_1$  ,  $T_2$  ) 内の水表面の空気圧の差により，水頭法が加圧法より水の溶解空気量が小さい。すなわち，試験体の低圧端に比したニードルバルブ (  $NV$  ) 直前の水の飽和空気溶解度は，適用圧力  $0.5\sim 2.0\ \text{Kg/cm}^2$  の加圧法の場合  $25^\circ\text{C}$  の水  $1\text{ml}$  中に  $+0.008\sim +0.032\ \text{ml}$  ( 標準状態 )<sup>75)</sup> であるのに対し，水頭法では  $+0.001\text{ml}$  ( 同 ) である。

GF 模型および木材試験体の保持セル (  $H$  ) は図 2 - 2 に示すものを用いた。

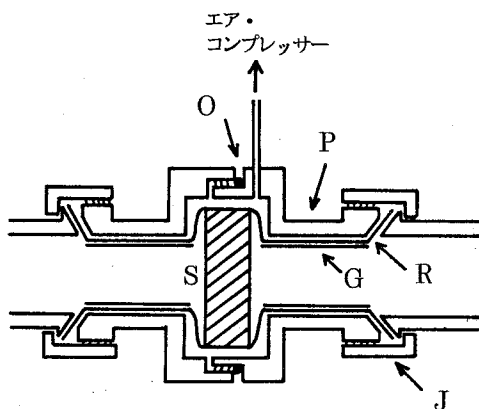


図 2 - 2 試験体保持セル

S : 試験体, R : ゴム・チューブ, G : ガラス管,  
P : ステンレス製管, O : ゴム “o” リング,  
J : カップ・ナット・ジョイント

模型または試験体とゴム・チューブの間の水の漏れを防ぐため，ゴム・チューブの外側から水の圧力よりやや高い圧力をエア・コンプレッサーで加え，試験体側面とゴム・チューブを密着させた。その結果，水の漏れは検出されなかつ

た。保持セルは  $25 \pm 0.1^\circ\text{C}$  の恒温水槽 (W) 内に置き、試験体および流動液体の温度を一定に保った。

水の圧力は水銀マンオメーター (M) で精度  $\pm 0.02 \text{ cmHg}$  で測定し、ニードルバルブで試験体両端間の圧力差 ( $\Delta P$ ) を一定に保ち、水の 1 分間の流動体積をメスシリンダー (MS) で測定し、単位時間当りの流動体積  $V(\text{cm}^3/\text{sec})$  を算出した。この測定精度は  $\pm 0.008 \text{ cm}^3/\text{sec}$  である。各実験における  $\Delta P$  は、比較を容易にするために類似の試験体で近似した  $V$  が得られるように決定した。さらにこの際、 $V$  の測定精度もあわせ考慮した。表 2-1 に示す実験条件の組み合わせで流動実験を行ない、同一条件で 3~5 回測定し、平均的なものを結果とした。

表 2-1 実験条件および 30 分後の流動比

実験番号	試験体	流動液体	$\Delta P$ (cmHg)	流動方法	流動比 <sup>1)</sup> (%)
1	GF模型 A	未ろ過	17.6	加圧法	80
2	A	GFろ過	4.1		100
3	B <sub>1</sub>	0.15MFろ過	27.9		90
4	B <sub>2</sub>	0.01MFろ過	65.7		75
5	木材 A	未ろ過	4.1		58
6	A	0.01MFろ過, 粒子懸たく液	4.1		39 <sup>2)</sup>
7	A	0.15MFろ過	4.1		87
8	A	0.01MFろ過	4.1		86
9	B	0.15MFろ過	4.1		88
10	C	0.01MFろ過	4.1		87
11	A	0.01MFろ過	4.1	水頭法	97
12	B	0.01MFろ過	4.1		95

1) 初期の流動体積 ( $V/A$ ) に対する 30 分後のその比

2) 粒子懸たく液の流動後の比



## 1.2 結果と考察

### 1.2.1 GF模型

孔径  $20 \sim 30 \mu\text{m}$  の GF 模型 A について，未ろ過および GFろ過蒸留水の加圧法による単位時間，単位断面積当りの流動体積  $V/A$  ( $\text{cm}/\text{sec}$ ) の経時変化を図 2-3 に示す。未ろ過蒸留水（図 2-3 の 1）では時間の経過に伴って

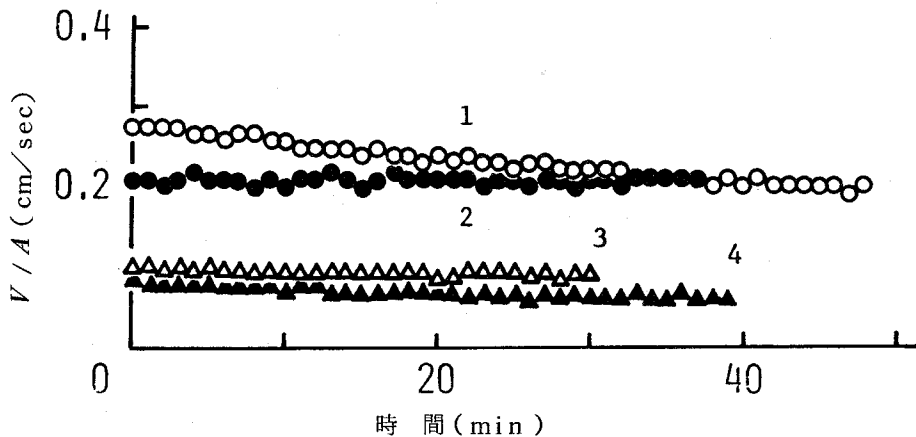


図 2-3 水の流動体積 ( $V/A$ ) の経時変化 (GF 模型)

- 1 : GF 模型 A，未ろ過蒸留水， $\Delta P = 17.6 \text{ cmHg}$ ，加圧法，
- 2 : GF 模型 A，GFろ過蒸留水， $\Delta P = 4.1 \text{ cmHg}$ ，加圧法，
- 3 : GF 模型 B<sub>1</sub>，0.15 MFろ過蒸留水， $\Delta P = 27.9 \text{ cmHg}$ ，加圧法，
- 4 : GF 模型 B<sub>2</sub>，0.01 MFろ過蒸留水， $\Delta P = 65.7 \text{ cmHg}$ ，加圧法

$V/A$  が低下しているのに対し，GFろ過蒸留水（2）では初期からはほぼ一定値を示す。初期の  $V/A$  に対する 30 分後の  $V/A$  の割合（以後流動比と呼び，その値を表 2-1 に示す）は，未ろ過および GFろ過の場合でそれぞれ 80，100% である。

半径  $r$  の毛管から気泡を押し出すのに要する圧力  $P$  ( $\text{dyne}/\text{cm}^2 = 0.75 \times 10^{-4} \text{ cmHg}$ ) は次式で表わされる。<sup>44)</sup>

$$P = 2 \sigma \cos \theta / r \quad \dots\dots\dots (2-1)$$

ここで， $\sigma$ ：液体の表面張力 (dyne/cm)，

$\theta$ ：液体と毛管壁との接触角。

いま， $25^{\circ}\text{C}$ の水の $\sigma = 71.96 \text{ dyne/cm} = 0.5399 \times 10^{-2} \text{ cmHg} \cdot \text{cm}$ ， $\theta = 0$ とすると，GF模型Aの毛管半径は $10 \sim 15 \mu\text{m}$ であり， $P = 10.8 \sim 7.2 \text{ cmHg}$ となる。したがって，前記の流動実験で試験体内に新たに気泡が発生したとしても，未ろ過の蒸留水の場合には $\Delta P = 17.6 \text{ cmHg}$ であり，気泡は押し出されるが， $\Delta P = 4.1 \text{ cmHg}$ のGFろ過蒸留水の場合には押し出されることはあり得ないこととなる。そこで，GFろ過の場合 $V/A$ が一定であったことは，GF模型Aの比較的均一な毛管通路内では圧力低下による新たな気泡の発生がないことを意味する。さらに，未ろ過の場合の $V/A$ の低下は，水に混入する固体粒子による通路の閉鎖が原因であることが考えられる。また，未ろ過の場合 $\Delta P$ がGFろ過の4倍以上であるのに初期の $V/A$ にあまり差がないことは，実験に先立ち模型を流動液体で飽和する過程において既に固体粒子によってある程度の通路が閉鎖されていることによると考えられる。

次に，GF模型 $B_1$ （図2-3の3）および $B_2$ （4）について，それぞれ $0.15 \text{ MF}$ および $0.01 \text{ MF}$ ろ過蒸留水の加圧法による流動実験の結果は，いずれも時間の経過に伴って $V/A$ が低下する。しかも，模型 $B_1$ では低下は小さくほぼ一定値に近づくのに対し，模型 $B_2$ ではかなりの低下が継続して見られ，流動比はそれぞれ90，75%である。これらの実験に用いた蒸留水は，いずれも模型 $B_1$ ， $B_2$ に内蔵されているメンブランフィルターの孔径（ $0.22 \mu\text{m}$ ）より小さい孔径のメンブランフィルターで実験直前に固体粒子を取り除いているので，これらの $V/A$ の低下は固体粒子による通路の閉鎖によるものではない。これは，水が模型の高圧側のメンブランフィルターを通過した直後に受ける圧力低下によって気泡が発生し，グラスフィルターまたは低圧側のメンブランフィルターを閉鎖したことによると考えられる。これらのフィルターから気泡を押し出すのに要する圧力は，（2-1）式にしたがうとそれぞれ10.8，98.2 cmHgである。一方，直列に接続した二つの通路の一つが部分

的に閉鎖されるとき，その通路における流動抵抗が大きくなり，全圧力差に対するその通路両端間の圧力差の割合が増加する。すなわち，気泡によって閉鎖されたフィルター両端間の圧力差は $V/A$ の低下に伴って増加する。その結果，模型 $B_1$  ( $\Delta P = 27.9 \text{ cmHg}$ )の場合， $V/A$ が初期の値の約70%になったときグラスフィルター両端間の圧力差が10.8 cmHgとなり，ようやく気泡が押し出され得ることになる。しかし，測定された流動比は90%であり，実際には気泡は押し出されることはない。模型 $B_2$  ( $\Delta P = 65.7 \text{ cmHg}$ )の場合98.2 cmHg以上となることはなく，気泡はメンブランフィルターから全く押し出されない。以上のように，両模型とも通路から気泡が押し出されることはない。しかし，両実験における流動液体の溶解空気量は異なる。すなわち，模型 $B_1$ および $B_2$ における水の飽和空気溶解度はその低圧端に比べてそれぞれ水1 ml当り+0.008，+0.02 ml（標準状態）<sup>75)</sup>であり，気泡発生の頻度が異なる。また，模型 $B_1$ と $B_2$ では発生した気泡によって閉鎖される通路の大きさが模型の構成上異なり，孔径の小さいメンブランフィルターを低圧側に持つ模型 $B_2$ が $B_1$ より気泡によって閉鎖される可能性が大きい。これらのことが両模型における流動比の差の原因と考えられる。

このように，針葉樹材樹軸方向の流動通路である仮道管内こうと壁孔膜小孔に，孔径において対応するGF模型による検討によって，時間の経過に伴う $V/A$ の低下の原因として，通路の閉鎖を招く次の二つの要因が明らかとなった。(1)流動水中に混入している固体粒子，(2)孔径に著しく差のある直列の通路における圧力低下によって，水の溶解空気量に依存して発生する気泡。

### 1.2.2 木材試験体

GF模型での検討によって，蒸留水中に混入している固体粒子による通路の閉鎖が $V/A$ の低下の原因の一つであることが明らかとなった。針葉樹材は孔径が2～3桁異なる仮道管内こうと壁孔膜小孔の直列な通路が主体であり，特に径の小さい壁孔膜小孔が固体粒子によって閉鎖されることが考えられる。

木材の場合についてこの関係を明らかにするために，木材試験体A（ヒノキ

辺材，厚さ4mm，直径15mmの木口円板）を用い， $\Delta P = 4.1$  cmHgで未ろ過（図2-4の5）および0.01MFろ過蒸留水（6）の加圧法による流動実験を行なった。そして，後者の実験の途中（図2-4の矢印）で0.01MFろ過蒸留水に，壁孔膜小孔径と近い大きさの粒径  $0.109 \pm 0.0027 \mu\text{m}$  のDow社製ユニフォーム・ラテックス球形粒子を濃度  $10^{-6}$  g/mlで分散させた懸だく液（粒子数  $1.4 \times 10^5$  個/ml）の流動実験を行なった。これらの  $V/A$  の経時変化を図2-4に示す。未ろ過蒸留水の場合0.01MFろ過蒸留水に比べて

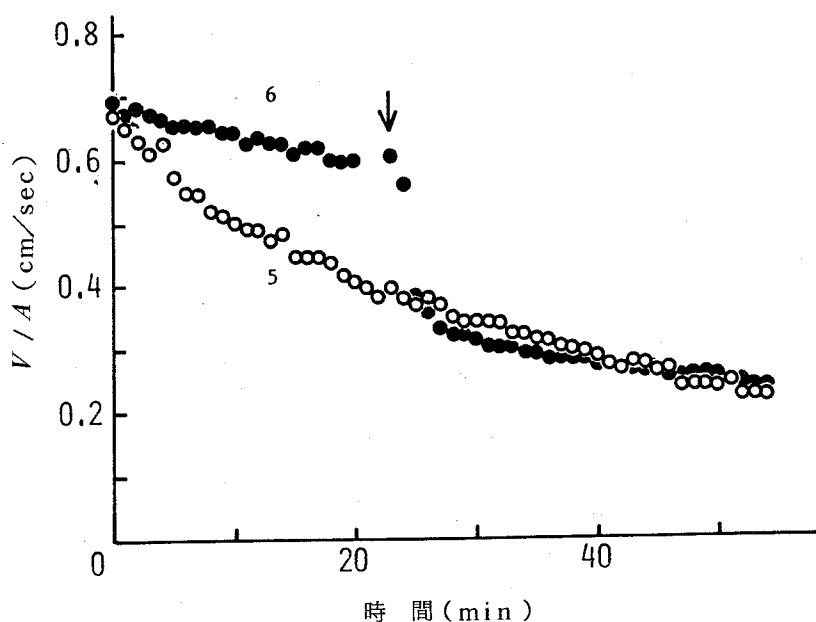


図2-4 水の流動体積 ( $V/A$ ) の経時変化（木材試験体：ヒノキ辺材，厚さ4mm，直径15mmの木口円板， $\Delta P = 4.1$  cmHg，加圧法）  
 矢印：粒子懸だく液の流動開始，  
 5：未ろ過蒸留水，  
 6：0.01MFろ過蒸留水

急速に  $V/A$  が低下する。後者の場合孔径  $0.01 \mu\text{m}$  のMFでろ過を行っているので水中の固体粒子による  $V/A$  の低下量は極めて小さく，観察された低

下は他の原因によると考えられる。したがって、未ろ過の場合の $V/A$ の低下量から0.01 MFろ過の場合の低下量を差し引いた値が、固体粒子による壁孔膜小孔の閉鎖によって生ずる低下量を表わすものと考えられる。一方、粒子懸たく液の流動の開始とともに $V/A$ は急激に低下する。この低下は流動液体に添加した粒子が壁孔膜小孔を閉鎖することによって生ずることは明らかである。その後、まだ閉鎖されていない壁孔膜小孔が徐々に閉鎖されていき、低下の割合は次第に小さくなる。また、未ろ過蒸留水および粒子懸たく液の場合の流動比はそれぞれ58, 39%であり、この差は懸たく液中の粒子による閉鎖面積が未ろ過蒸留水中の固体粒子によるそれよりも大きいことによると考えられる。以上のことから、木材の場合、流動液体中に混入している固体粒子が壁孔膜小孔を閉鎖することが $V/A$ の低下の原因の一つであることが明らかである。

そこで、 $V/A$ の低下に対する固体粒子の関係をさらに明らかにするために、木材試験体Aについてろ過条件の異なる0.15 MF (図2-5の7)および0.01 MFろ過蒸留水(8)を用い、 $\Delta P = 4.1$  cmHgで加圧法により流動実験を行なった結果を図2-5に示す。いずれも $V/A$ の低下が見られるが、未ろ過(図2-4の5)の場合と比べて低下量は小さい。ろ過条件が異なり水中に残存し得る固体粒子の最大径と数が異なるのにかかわらず、流動比は0.15 MFおよび0.01 MFろ過の場合でそれぞれ87, 86%とほぼ等しい。これは、未ろ過の場合に $V/A$ の低下を引き起こす固体粒子は $0.15 \mu\text{m}$ 以上の大きさであることを示唆する。また、未ろ過の場合の流動比(58%)をあわせ考慮するとき、これらの固体粒子による壁孔膜小孔の閉鎖が $V/A$ の約30%の低下を引き起こすことが示唆される。そして、ここで観察された2種のろ過蒸留水の場合の $V/A$ の13~14%の低下は、固体粒子以外の原因によると考えられる。

そこで、壁孔膜のトーラスの移動による壁孔の通路の縮小が $V/A$ の低下の原因となり得るかどうかを検討した。そのために、繊維方向厚さがそれぞれ平均仮道管長および最小仮道管長より短く、木材試験体Aに比べて通路に壁孔を

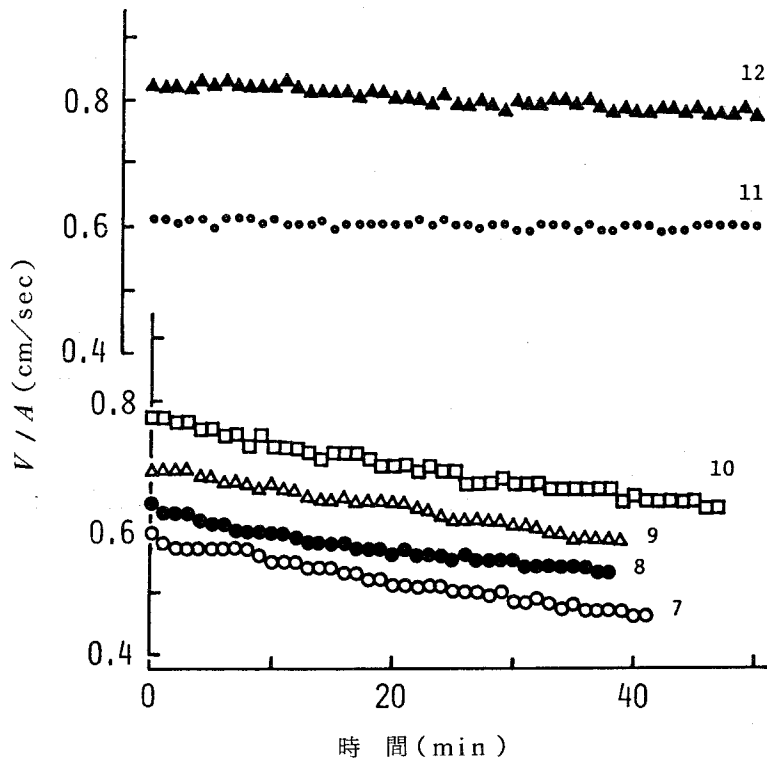


図 2 - 5 水の流動体積 ( $V/A$ ) の経時変化 (木材試験体：ヒノキ辺材，直径 15mm の木口円板， $\Delta P = 4.1 \text{ cmHg}$ )

- 7 : 厚さ 4mm, 0.15 MF ろ過蒸留水, 加圧法,
- 8 : 厚さ 4mm, 0.01 MF ろ過蒸留水, 加圧法,
- 9 : 厚さ 3mm, 0.15 MF ろ過蒸留水, 加圧法,
- 10 : 厚さ 2mm, 0.01 MF ろ過蒸留水, 加圧法,
- 11 : 厚さ 4mm, 0.01 MF ろ過蒸留水, 水頭法,
- 12 : 厚さ 3mm, 0.01 MF ろ過蒸留水, 水頭法

含む確率が小さい木材試験体 B (図 2 - 5 の 9) および C (10) を用い， $\Delta P = 4.1 \text{ cmHg}$  で加圧法によりそれぞれ 0.15 MF および 0.01 MF ろ過蒸留水の流動実験を行なった。それらの結果を図 2 - 5 に示す。試験体 B および C における流動比はそれぞれ 88，87% とほぼ等しく，さらにこれらの値は試験体 A (No. 7, 8) の場合ともほとんど差がない。液体流動の場合 Hagen-Poiseuille 則 ((1 - 2) 式) により  $V/A$  は毛管径の 4 乗に比例する。そこ

で、仮道管内こうに比べて径の極めて小さい壁孔の数が少ないと考えられる繊維方向厚さの薄い試験体ほど、トールスが移動し壁孔の通路の大きさが縮小することによる $V/A$ の低下の効果は小さくなるはずである。したがって、ここで得られた結果は、 $\Delta P = 4.1 \text{ cmHg}$ の本実験ではトールスの移動はほとんどなく、 $V/A$ の低下の原因とはならないことを示している。

次に、水中の溶解空気から発生した気泡による通路の閉鎖が $V/A$ の低下の原因となるかどうかを明らかにするために、水中の溶解空気量が加圧法に比べて小さい水頭法により流動実験を行なった結果を図2-5に示す。0.01MFろ過蒸留水を用いた木材試験体A(図2-5の11)およびB(12)における流動比はそれぞれ97, 95%であり、加圧法(7, 8, 9)の場合と比較して $V/A$ の低下はいずれも極めて小さい。これは、水頭法が加圧法に比べ水中の溶解空気量が小さいため、圧力低下で気泡の発生する頻度が小さいことによると考えられる。いま、壁孔膜小孔の半径を $0.1 \mu\text{m}^3$ とすると、これから気泡を押し出すのに要する圧力は(2-1)式から1080 cmHgであり、本実験における $\Delta P = 4.1 \text{ cmHg}$ では気泡が押し出されることはない。したがって、水が最初に出会う壁孔膜小孔を通過した直後に圧力低下を受けて発生した気泡が、次に出会った壁孔膜小孔を閉鎖することが $V/A$ の低下の主要な1因になるものと考えられる。しかし、前述のように最小仮道管長より短い試験体C(図2-5の10)においても $V/A$ の低下が見られた。これは、気泡による閉鎖は壁孔膜小孔ばかりでなく、仮道管内こうにおいても起こることを示唆する。また、水頭法において見られた $V/A$ の3および5%の低下は、本法において存在する水1ml当り+0.001ml(標準状態)<sup>75)</sup>の溶解空気から発生した気泡によると考えられる。したがって、一定の $V/A$ を得るためには、流動実験をさらに低い $\Delta P$ で行なうことにより、気泡発生の頻度を低下させることが必要であると思われる。

以上の結果から、 $\Delta P = 4.1 \text{ cmHg}$ の本実験では、ヒノキ辺材樹軸方向における時間の経過に伴う水の流動体積低下の主要な原因は、トールスの移動によ

る壁孔の通路の縮小ではなく，壁孔膜小孔が固体粒子および発生する気泡によって閉鎖されることであることが明らかとなった。したがって，流動実験において流動体積の一定値を得るためには，流動液体に対して(1)固体粒子の除去，(2)溶解空気量の低下，の二つの前操作を行ない，しかも(3)低い $\Delta P$ で流動実験を行なう，ことが必要である。

### 1.2.3 定常流動

前項において，液体の定常層流条件の一つである一定流動体積を得るための実験条件が明らかとなった。そこで，そのような条件下で流動実験を行なったとき，方向の反転が流動体積に影響を与えるかどうかを明らかにするために，木材試験体 A について 0.01 M Fろ過蒸留水を用い， $\Delta P = 1.2 \text{ cmHg}$  で水頭法による流動実験を行なった。すなわち，実験開始数十分後流動方向を反転し，さらに数十分後再び方向を反転したときの  $V/A$  の経時変化を求めた。結果を図 2-6 に示す。 $V/A$  が実験時間にわたって一定で，方向の反転で変化が見

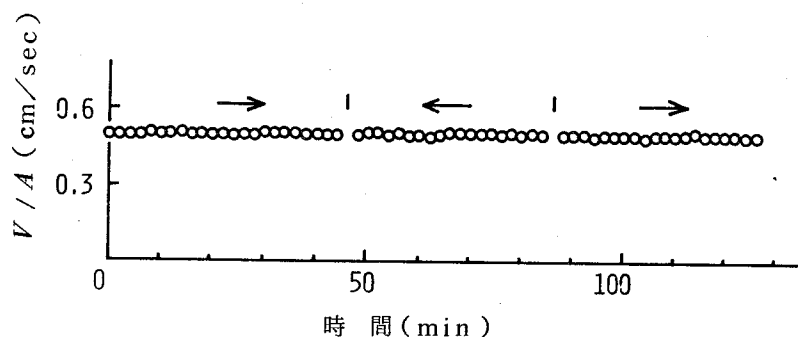


図 2-6 水の流動体積 ( $V/A$ ) の経時変化 (木材試験体 A : ヒノキ辺材, 0.01 M Fろ過蒸留水,  $\Delta P = 1.2 \text{ cmHg}$ , 水頭法)  
矢印: 2 流動方向

られない。この結果は次のように説明できる。すなわち，既往の研究<sup>23), 34), 40)</sup>でしばしば観察されてきた流動方向の反転による流動体積の変動は，壁孔膜小孔を閉鎖していた固体粒子や気泡が方向の反転で引き離され，その小孔が再び通路として有効となることによるものである。これに反して本実験では，前項



の検討から明らかなように、水に固体粒子を含まず、さらにその溶解空気量および試験体中を通る際の圧力低下が十分小さいために気泡を発生せず、これらによる壁孔膜小孔の閉鎖がなかった。この結果、流動方向の反転により流動体積の変動がみられなかったものと考えられる。

次に、流動体積と  $\Delta P$  の関係を明らかにするために、木材試験体 A について 0.01 M F ろ過蒸留水を用いた水頭法による流動実験において、 $\Delta P$  を連続的に増加および減少させたときの  $V/A$  と  $\Delta P$  の関係を図 2-7 に示す。これら

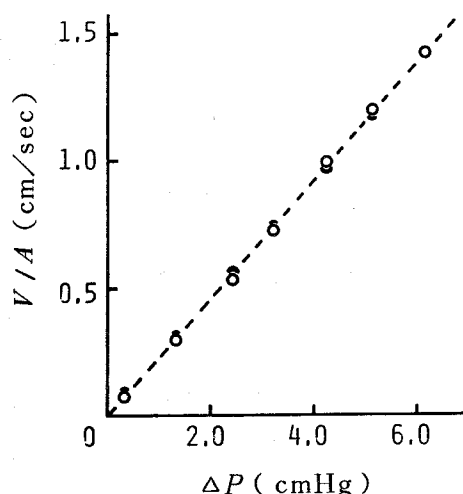


図 2-7 水の流動体積 ( $V/A$ ) と両端間圧力差 ( $\Delta P$ ) の関係  
 (木材試験体 A : ヒノキ辺材, 0.01 M F ろ過蒸留水, 水頭法)  
 ○ : 加圧過程, ● : 減圧過程

はほぼ比例関係にある。第 1 章で述べたように、流動が層流状態であれば Hagen-Poiseuille 式 ( (1-2) 式 ) が成り立ち、同一の試験体および液体に対して流動体積は  $\Delta P$  と比例する。したがって、本実験においては乱流は生じておらず、流動は層流状態であることが示唆される。

以上のように、壁孔膜小孔を閉鎖して流動体積の低下の原因となる水中の固体粒子を取り除き、気泡を発生する水の溶解空気量を低下させ、さらに気泡発

生の頻度を小さくするために低い  $\Delta P$  で流動実験を行なうとき，定常層流条件が満足されることが明らかとなった。

## 2 乱流の発生要因としての壁孔膜小孔<sup>76)</sup>

木材中の気体の流動では粘性流動のほかに，壁孔膜小孔径が気体分子の平均自由行程と同じオーダーの大きさであるために気体分子と毛管壁との衝突による分子流が無視できないことを第1章に述べた。Sebastian<sup>46)</sup>はホワイトスプルース木口試験体の酸素ガスの流動実験で  $V_p/\Delta P$  と平均圧力  $\bar{p}$  の間に直線関係を得，Adzumi式（（1-8）式）の適用性を明らかにしている。一方，Reynolds数  $R$ 。（（1-11）式）が臨界値を越えると層流から乱流への流動状態の移行が起こることを述べた。仮道管内こうおよび壁孔膜小孔という径の非常に異なる通路から成る針葉樹材の場合，均一な毛管よりも低い  $R$ 。値で乱流が発生することが予測される。

また，気体は温度  $T$  により粘性係数  $\eta$ ，平均自由行程  $\lambda$  等の値が変化するため，流動が温度によって影響を受けることを前章に述べた。すなわち， $V_p T/\Delta P T'$  が  $\sqrt{T}$  に関して粘性流動を表わす双曲線と分子流を表わす直線との和で表わされ，また  $K_g$  が  $T$  に関して一次関係となることが予測された。

そこで，木材中の流動における分子流および乱流の発生と壁孔膜小孔との関連，そして実験温度による流動の変動を明らかにするために，ヒノキ辺材および心材の全乾材を供試材として種々の適用圧力および温度条件下で乾燥空気の流動実験を行なった。本節ではその結果を論述する。

### 2.1 実験材料および方法

供試材は，奈良県吉野産の60年生ヒノキの胸高位から採取した辺材および心材である。これから，樹軸方向に連続して直径約15mm，厚さ4および8mm

の各 3 個の円板状木口試験体を採取した。風乾後  $105^{\circ}\text{C}$  で 48 時間 炉乾燥して供試した。全乾比重は辺材と心材であまり差がなく、平均 0.42 であった。

流動気体として、シリカゲルを入れた管およびアセトン・ドライアイス寒剤（約  $-86^{\circ}\text{C}$ ）中に浸せきしたトラップによって試験体に流入する直前で水分を除去した乾燥空気を用いた。そして、図 2-8 の装置により試験体樹軸方向

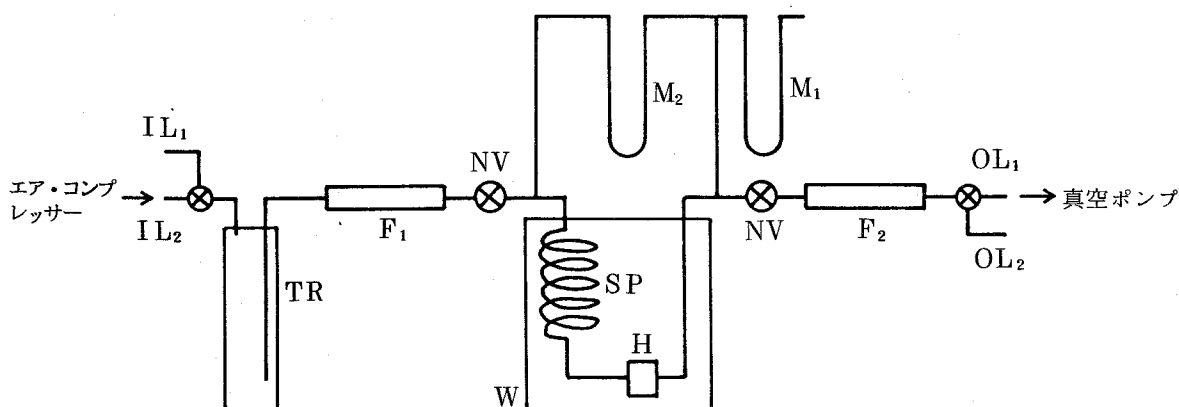


図 2-8 実験装置

$F_1$ ,  $IL_1$ ,  $OL_1$  : 大気圧以下での測定用フロートメーター，流入口，  
流出口，

$F_2$ ,  $IL_2$ ,  $OL_2$  : 大気圧以上での測定用フロートメーター，流入口，  
流出口，

TR : 水分トラップ，NV : ニードルバルブ，SP : らせん管，

H : 試験体保持セル， $M_1$ ,  $M_2$  : 水銀マノメーター，W : 恒温水槽

における流動実験を行なった。この装置は，系の圧力が 1 気圧以下の測定には流入側（ $IL_1$ ）を大気に解放して流出側（ $OL_1$ ）から真空ポンプで，圧力が 1 気圧以上の測定には流出側（ $OL_2$ ）を大気に解放して流入側（ $IL_2$ ）からエア・コンプレッサーでそれぞれ空気を流動させるよう設計したものである。試験体保持セル（H）およびその直前のらせん状パイプ（SP）を恒温水槽中に置いて試験体および流動空気の温度（ $t^{\circ}\text{C} = T^{\circ}\text{K}$ ）を一定に保ち，加圧および減圧

過程で連続的に流動実験を行なった。試験体保持セルは、1気圧以下の測定にはゴム・チューブとポリエチレン管を、1気圧以上の測定には図2-2に示したものを用了。後者の場合ゴム・チューブの外側から流動空気の圧力よりやや高い圧力をエア・コンプレッサーにより適用して試験体側面とゴム・チューブを密着させた。いずれのセルも流動空気の漏れは検出されなかった。試験体の低圧側の圧力および試験体両端間の圧力差を二つのニードルバルブ(NV)によって調節し、これらを水銀マンオメーター( $M_1, M_2$ )で、乾燥空気の流動体積を草野科学製フロートメーター(F)で測定した。また、実験時の大気の温度( $T'$  °K)および大気圧( $p$  cmHg)を測定した。これらの測定値から試験体内の平均圧力 $\bar{p}$  (cmHg), 両端間圧力差 $\Delta P$  (cmHg), 流動体積 $V$  (cm<sup>3</sup>/sec)を算出し、比流動体積 $V p T / A \Delta P T'$  (cm/sec)を求めた。そして、 $\bar{p} = 5 \sim 230$  cmHg,  $\Delta P = 1, 3, 5$  cmHg,  $t = 30^\circ\text{C}$  ( $T = 303.2^\circ\text{K}$ )の条件下で乾燥空気の流動実験をすべて同一試験体について行なった。さらに厚さ4mmの辺材および心材試験体については $\bar{p} = 5 \sim 230$  cmHg,  $\Delta P = 1$  cmHg,  $t = 20$  ( $T = 293.2^\circ\text{K}$ ) および  $40^\circ\text{C}$  ( $T = 313.2^\circ\text{K}$ )での流動実験を行なった。

## 2.2 結果と考察

### 2.2.1 分子流および乱流の発生

供試ヒノキ辺材および心材の厚さ4および8mm試験体について、 $\Delta P = 1$  cmHg,  $t = 30^\circ\text{C}$ における乾燥空気の比流動体積 $V p T / A \Delta P T'$ と平均圧力 $\bar{p}$ の関係を図2-9および2-10に示す。比流動体積は、 $\bar{p}$ が同一のとき辺材が心材より、厚さ4mm試験体が8mm試験体より大きく、流動が容易であることを示す。また、いずれもほぼ直線に近い関係である。最小自乗法による実験値の回帰直線を図中に点線で示す。(1-8)式で明らかなように、分子流はこの直線の切片の大きさによって表わされる。低い $\bar{p}$ , すなわち気体分子の平均自由行程 $\lambda$ が大きいとき、比流動体積に対する分子流の比率が大きくなり、

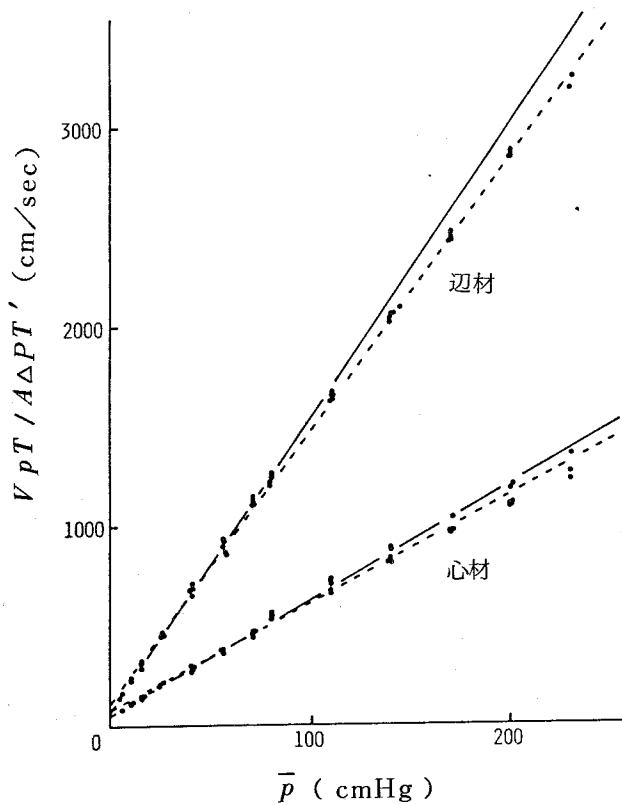


図 2 - 9 乾燥空気の比流動体積 ( $V p T / A \Delta P T'$ ) と平均圧力 ( $\bar{p}$ ) の関係 (4 mm 厚ヒノキ円板状木口試験体,  $\Delta P = 1$  cmHg,  $t = 30$  °C)

----- : 未補正回帰直線

———— : 乱流の影響を除いた回帰直線

重要となることがわかる。例えば、厚さ 4 mm の辺材試験体において分子流の比率が約 50 % となる  $\bar{p} = 10$  cmHg のとき, (1-7) 式から  $\lambda = 0.51 \mu\text{m}$  であり, これは壁孔膜小孔径と同じオーダーの大きさである。このように壁孔膜小孔において分子流の寄与が大きいことが示唆される。

次に, 厚さ 4 mm のヒノキ辺材および心材試験体について  $t = 30$  °C,  $\Delta P = 3$  および 5 cmHg における乾燥空気の比流動体積と  $\bar{p}$  の関係を図 2 - 11 および 2 - 12 に示す。流動が層流状態であれば (1-8) 式が成り立ち,  $\Delta P$  に

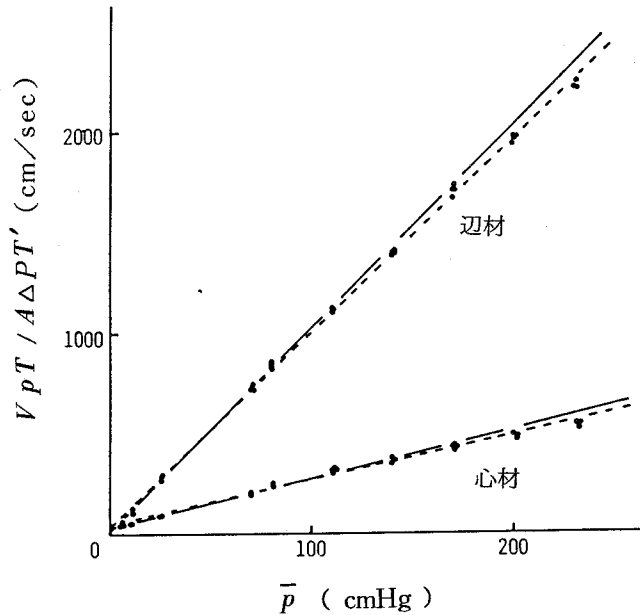


図 2 - 10 乾燥空気の比流動体積 ( $VpT/A\Delta PT'$ ) と平均圧力 ( $\bar{p}$ ) の関係 (8mm厚ヒノキ円板状木口試験体,  $\Delta P = 1$  cmHg,  $t = 30^\circ\text{C}$ )

----- : 未補正回帰直線  
 ————— : 乱流の影響を除いた回帰直線

かかわらず比流動体積と  $\bar{p}$  は直線関係となる。最小自乗法による実験値の回帰直線を両図に点線で示す。これらの直線は、 $\Delta P = 1$  cmHg (図 2 - 9) の場合と比べていずれの  $\Delta P$  においても、特に辺材試験体で低い  $\bar{p}$  において実験値と点線との間に明かなずれが見られる。

そこで、比流動体積に対する  $\Delta P$  の影響を明らかにするため、各  $\Delta P$  に対する比流動体積 -  $\bar{p}$  の回帰直線 (図の点線) から同一の  $\bar{p}$  における比流動体積を算出し、これを  $\bar{p}$  をパラメーターとして  $\Delta P$  に対してプロットした。厚さ 4mm の辺材および心材試験体における関係をそれぞれ図 2 - 13 および 2 - 14 に、厚さ 8mm の辺材試験体における関係を図 2 - 15 に示す。流動が層流状態であれば (1 - 8) 式の右辺に  $\Delta P$  を含まないことから、一定の  $\bar{p}$  における比流動

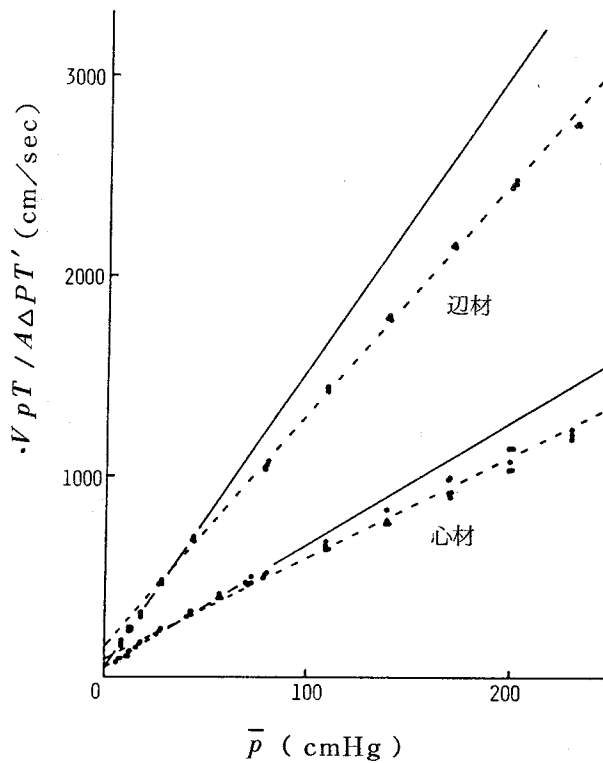


図 2 - 11 乾燥空気の比流動体積 ( $\cdot V p T / A \Delta P T'$ ) と平均圧力 ( $\bar{p}$ ) の関係 (4mm厚ヒノキ円板状木口試験体,  $\Delta P = 3$  cmHg,  $t = 30$  °C)

----- : 未補正回帰直線

———— : 乱流の影響を除いた回帰直線

体積は  $\Delta P$  に無関係に一定値となる。しかし、いずれの試験体でも  $\Delta P$  の増加に伴って比流動体積が低下し、この低下量は  $\bar{p}$  の増加に伴って大きくなっている。すなわち、辺材では 4 および 8mm 厚さの試験体はともに  $\bar{p} > 1$  気圧で比流動体積が  $\Delta P$  の増大で明らかに低下し、 $\bar{p} < 1$  気圧ではその程度が小さい。一方、心材では  $\bar{p} > 1$  気圧でわずかな低下が見られるが、 $\bar{p} < 1$  気圧ではほぼ一定である。このように、 $\bar{p}$  が大となって比流動体積が大きくなるとき、 $\Delta P$  の増大による比流動体積の低下が大きいことから、これらの低下は乱流の発生によることが考えられる。

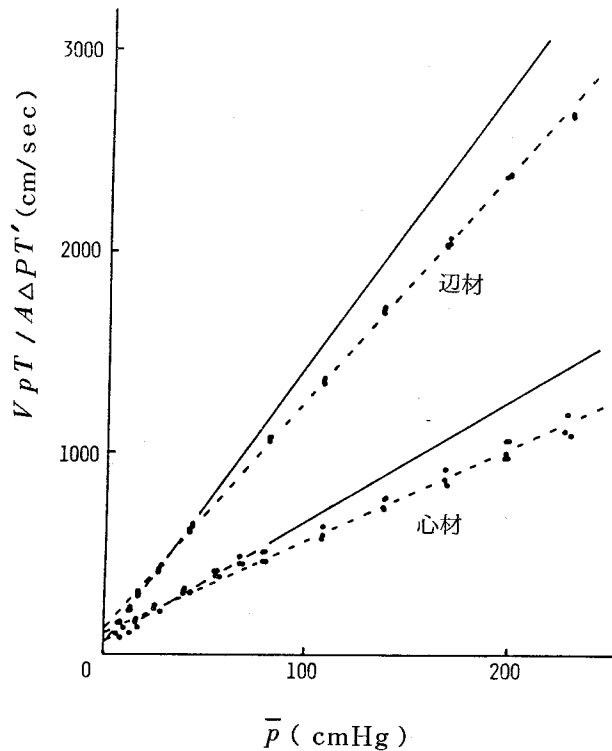


図 2 - 12 乾燥空気の比流動体積 ( $VpT/A\Delta PT'$ ) と平均圧力 ( $\bar{p}$ ) の関係 (4mm厚ヒノキ円板状木口試験体,  $\Delta P = 5$  cmHg,  $t = 30$  °C)

----- : 未補正回帰直線

———— : 乱流の影響を除いた回帰直線

そこで、乱流の発生の有無を明らかにするために、その指標となる Reynolds 数  $R_e$  を考慮するのが一般であるが、複雑な流動通路を構成する木材の場合、 $R_e$  値を求めることは極めて困難である。しかし、本実験の場合各圧力差条件に対して同一試験体を用いていること、および実験温度が一定 ( $t = 30$  °C) であることから、第 1 章で述べたように流速  $v$  に比例する試験体中の実際の流動体積  $VpT/A\bar{p}T'$  と、気体の動粘性係数  $\nu (= \eta/\rho)$  の逆数に比例する  $\bar{p}$  を考慮することによって、 $R_e$  値の評価がある程度可能である。図 2 - 16 に厚さ 4mm の辺材試験体について  $\Delta P = 1, 3, 5$  cmHg における  $VpT/A\bar{p}T'$



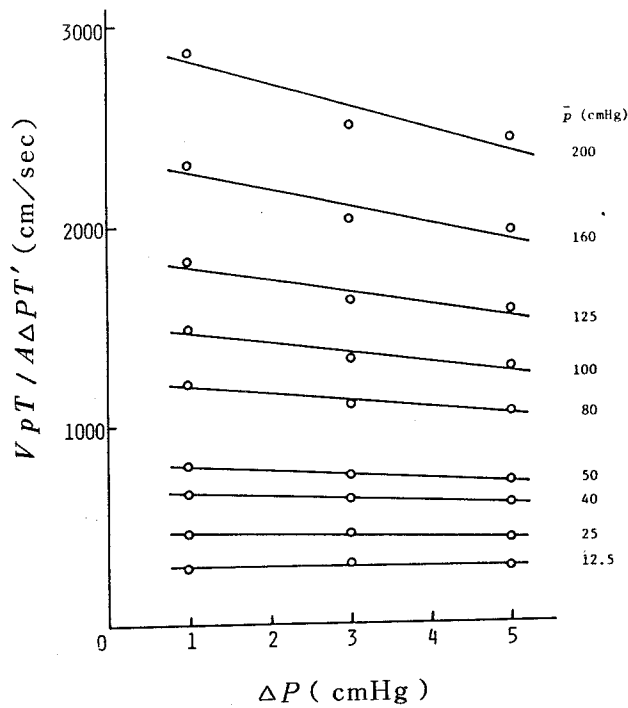


図 2 - 13 乾燥空気の比流動体積 ( $VpT/A\Delta PT'$ ) と両端間圧力差 ( $\Delta P$ ) の関係 (4mm厚ヒノキ辺材円板状木口試験体,  $t = 30^\circ\text{C}$ )

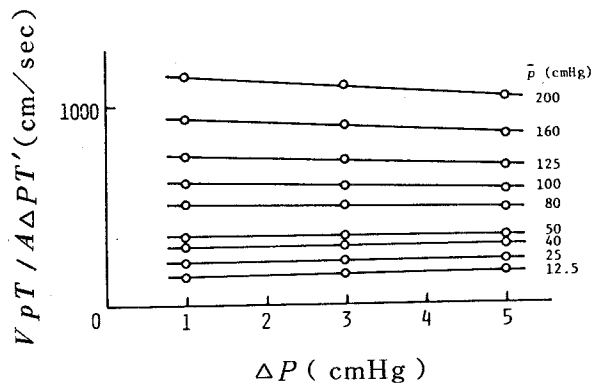


図 2 - 14 乾燥空気の比流動体積 ( $VpT/A\Delta PT'$ ) と両端間圧力差 ( $\Delta P$ ) の関係 (4mm厚ヒノキ心材円板状木口試験体,  $t = 30^\circ\text{C}$ )

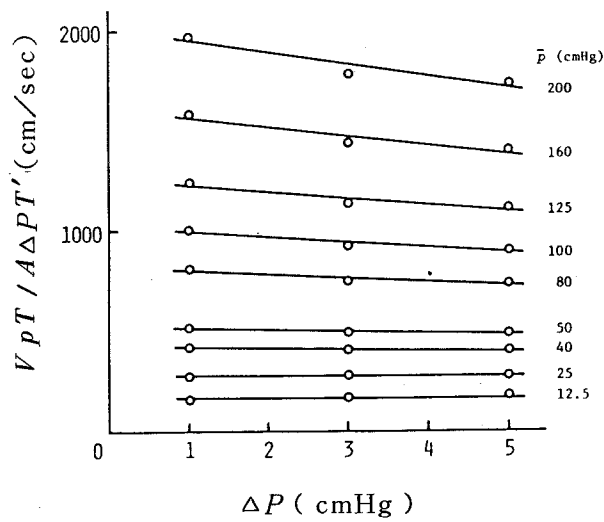


図 2 - 15 乾燥空気の比流動体積 ( $V_p T / A \Delta P T'$ ) と両端間圧力差 ( $\Delta P$ ) の関係 (8mm厚ヒノキ辺材円板状木口試験体,  $t = 30^\circ\text{C}$ )

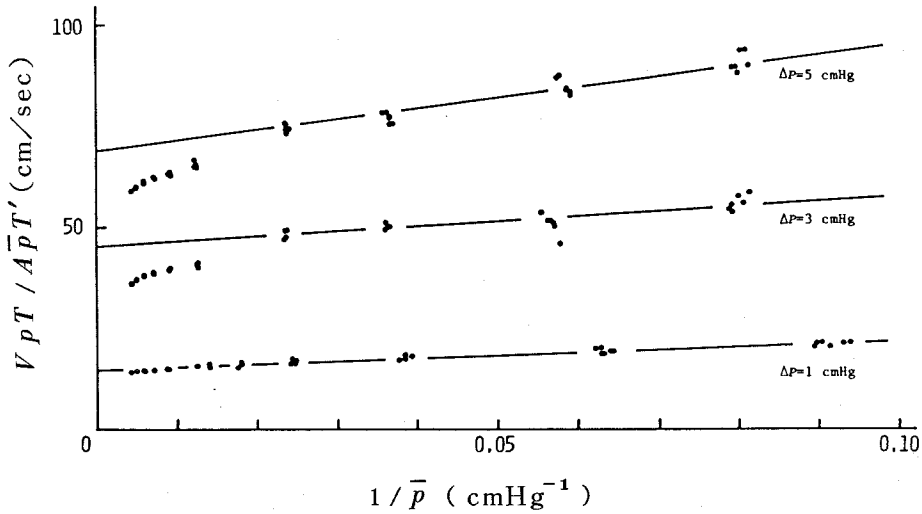


図 2 - 16 試験体中の乾燥空気の実際の流動体積 ( $V_p T / A \bar{p} T'$ ) と平均圧力の逆数 ( $1 / \bar{p}$ ) の関係 (4mm厚ヒノキ辺材円板状木口試験体,  $t = 30^\circ\text{C}$ )

—— : 乱流の影響を除いた回帰直線

と  $1/\bar{p}$  の関係を示す。流動が層流状態であれば、(1-8)式の両辺を試験体断面積  $A$  で割り  $\Delta P/\bar{p}$  を掛けて得られる次式から明らかなように、 $V_p T/A\bar{p}T'$  は一定の  $\Delta P$  に対して  $1/\bar{p}$  と直線関係となる。

$$\frac{V_p T}{A\bar{p}T'} = \Delta P \left( \frac{n\pi r^4}{8L\eta} + \frac{4}{3} \frac{n\gamma r^3}{L} \sqrt{\frac{2\pi RT}{M}} / \bar{p} \right) \dots (2-2)$$

しかし、 $\Delta P = 1$  cmHg ではほぼ直線関係であるが、 $\Delta P = 3, 5$  cmHg では  $1/\bar{p}$  の小さい部分で  $V_p T/A\bar{p}T'$  と  $1/\bar{p}$  の関係は明らかな曲線を示す。そこで、図2-13で示したように  $\Delta P$  の増加に伴う比流動体積の低下が小さく、ほぼ層流状態と考えられる  $\bar{p} < 1$  気圧の実験値のみを用いて最小自乗法により回帰直線を求め、図に実線で示す。 $\Delta P = 3, 5$  cmHg では実験値が  $1/\bar{p}$  の小さい部分でこの直線から大きくずれることがわかる。これは、乱流が発生していることを示す。すなわち、 $\Delta P = 1$  cmHg では  $V_p T/A\bar{p}T'$  が小さいため  $\bar{p}$  がある程度大きい部分においても  $R_e$  値が臨界値を越えずほぼ層流状態であった。しかし、 $\Delta P$  の増加によって  $V_p T/A\bar{p}T'$  が大となり、さらにこの際  $\bar{p}$  が大きくなるとき、 $R_e$  値が臨界値を越えたものであると考えられる。このように、 $\Delta P = 3, 5$  cmHg では  $\bar{p} > 1$  気圧で乱流が発生している。したがって、先に図2-13において観察された  $\Delta P$  の増加に伴う比流動体積の低下は、 $\Delta P$  の増加によって流速が増加し、この際  $\bar{p}$  が大きいとき流動空気の密度が大きくなり、 $R_e$  値が大となって乱流が発生したことによるものであると考えられる。

そこで、乱流の影響を除いた層流状態における比流動体積と  $\bar{p}$  の関係を得るために、ほぼ層流状態と考えられる  $\bar{p} < 1$  気圧についての実験値のみを用いて最小自乗法により回帰直線を求めた。これらを図2-9から2-12のそれぞれに実線で示す。図2-9および2-10に示した  $\Delta P = 1$  cmHg の場合全実験値を用いた回帰直線(点線)と実線との差は小さい。しかし、図2-11および2-12に示した  $\Delta P = 3, 5$  cmHg の場合その差は大きく、乱流の影響

が大きいことを示す。実線と実験値との差が乱流による比流動体積の低下の大きさを示すものとする、いずれの試験体においても気体密度に比例する  $\bar{p}$  の増加に伴って乱流の影響が大きくなることとなる。

このような  $\bar{p} < 1$  気圧の実験値のみを用いて乱流の影響を除いた効果を次のように検討した。すなわち、厚さ 4 および 8 mm の辺材試験体について各  $\Delta P$  における比流動体積 -  $\bar{p}$  の乱流の影響を除いた回帰直線（実線）から同一の  $\bar{p}$  における比流動体積を算出した。これを  $\bar{p}$  をパラメーターとして  $\Delta P$  に対してプロットした関係を図 2-17 および 2-18 に示す。厚さ 4 mm の試験体では  $\Delta P = 3$  cmHg 以下、厚さ 8 mm の試験体では  $\Delta P = 5$  cmHg まで比流動体積が  $\Delta P$  の増加にかかわらずすべての  $\bar{p}$  においてほぼ一定となり、乱流の影響

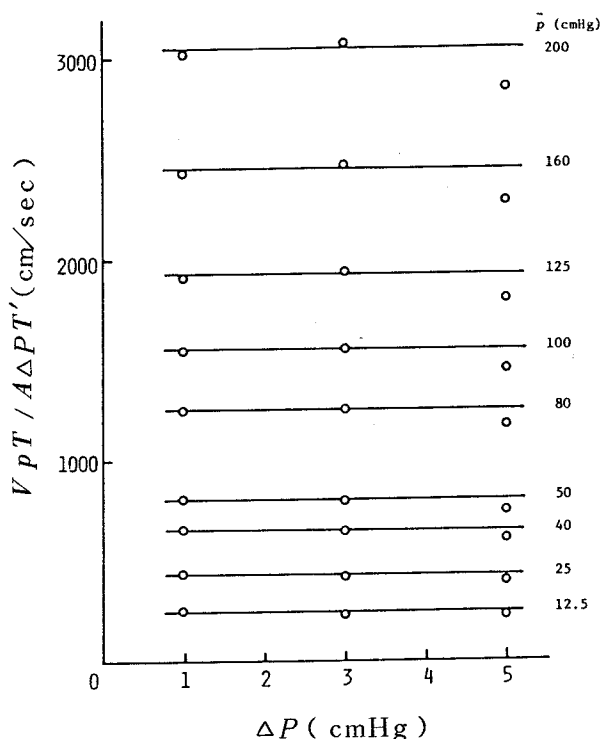


図 2-17 乱流の影響を除いた乾燥空気の比流動体積 ( $VpT / A\Delta PT'$ ) と両端間圧力差 ( $\Delta P$ ) の関係  
(4mm厚ヒノキ辺材円板状木口試験体,  $t = 30^\circ\text{C}$ )

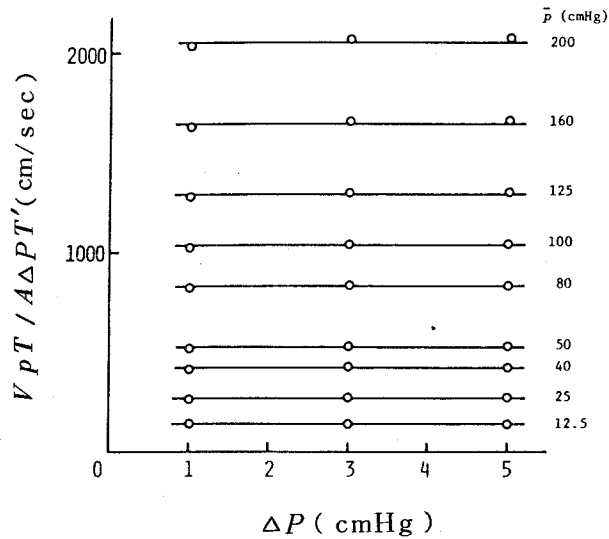


図 2 - 18 乱流の影響を除いた乾燥空気の比流動体積 ( $VpT / A\Delta PT'$ ) と両端間圧力差 ( $\Delta P$ ) の関係  
(8mm厚ヒノキ辺材円板状木口試験体,  $t = 30^\circ\text{C}$ )

を除いた効果が明らかである。しかし、厚さ4mmの試験体における  $\Delta P = 5$  cmHgでは比流動体積の低下が見られ、 $\bar{p}$ が大きいほど低下が著るしい。これは、 $\Delta P = 5$  cmHgでは  $VpT / A\bar{p}T'$  が大であるため、ここで乱流の影響を除くために用いた  $\bar{p} < 1$  気圧において既に  $R_e$  の臨界値が現われ、乱流が生じていたことを示している。したがって、厚さ4mmの辺材試験体の場合  $R_e$  の臨界値は  $\Delta P = 3$  cmHgで  $\bar{p} = 1$  気圧のときに現われることになる。図 2 - 16 からこのときの  $VpT / A\bar{p}T'$  は約 50 cm/secである。また、 $t = 30^\circ\text{C}$ 、 $\bar{p} = 1$  気圧のときの  $\nu = 0.16 \text{ cm}^2/\text{sec}$  である。したがって、 $R_e$  に比例する  $VpT / A\bar{p}T' \times 1/\nu$  は  $3.1 \times 10^2 \text{ cm}^{-1}$  となる。これは、例えばこの試験体中を水が流動するとき、 $30^\circ\text{C}$  の水の  $\nu = 0.01 \text{ cm}^2/\text{sec}$  であるので、水の流動体積  $V/A$  が 3.1 cm/sec のとき乱流が生ずることを示す。このように、仮道管内こう一壁孔膜小孔の直列通路から成る針葉樹材の場合比較的低い流動体積で乱流を生じることになる。もし木材を半径 10  $\mu\text{m}$  の仮道管内こうだけから成る均一な通路とした場合、どのくらいの流動体積で乱流が生ずるかを次のよ

うに検討した。すなわち，均一な毛管の場合第1章で述べたように  $R_e$  の臨界値は  $2200^{61)}$  である。したがって， $30^\circ\text{C}$  の乾燥空気の場合流速  $v = 1.76 \times 10^5 \text{ cm/sec}$ ， $30^\circ\text{C}$  の水の場合  $v = 1.1 \times 10^4 \text{ cm/sec}$  となる。また，単位断面積当りの仮道管数を  $10^5$  個/ $\text{cm}^2$  とすると，このときの  $VpT/A\bar{p}T' = 5.5 \times 10^4 \text{ cm/sec}$ ， $V/A = 1100 \text{ cm/sec}$  となる。これらの値は前記の辺材試験体の場合の実測値と比べ，極めて大きい流動体積まで乱流が生じないことを示す。このように，通路に壁孔膜小孔があることによって乱流が生じやすくなっていることがわかる。

次に，厚さ4mmの辺材および心材試験体について，(1-9)式により算出した見掛けの気体透過係数  $K_g$  と  $1/\bar{p}$  の  $\Delta P = 1 \text{ cmHg}$ ， $t = 30^\circ\text{C}$  における関係を図2-19に示す。 $1/\bar{p}$  の増加に伴って  $K_g$  が増加している。これは

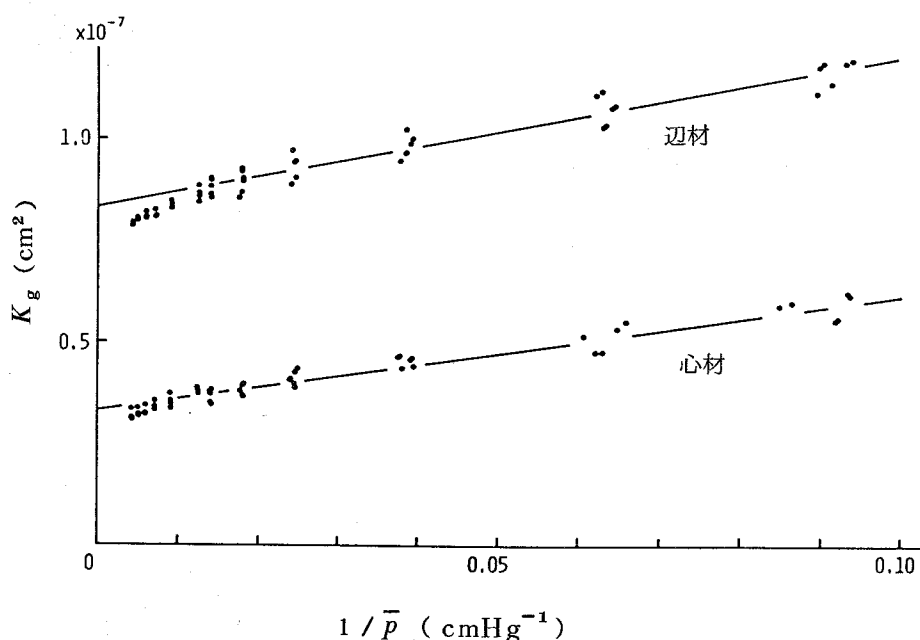


図2-19 試験体の見掛けの気体透過係数 ( $K_g$ ) と平均圧力の逆数 ( $1/\bar{p}$ ) の関係 (4mm厚ヒノキ円板状木口試験体， $\Delta P = 1 \text{ cmHg}$ ， $t = 30^\circ\text{C}$ )

——：乱流の影響を除いた回帰直線

$\bar{p}$  の低下に伴って分子流の比率が大きくなるためである。また、流動が層流状態であれば (1-10) 式で明らかなように  $K_g - 1/\bar{p}$  は直線関係となる。図の実線はほぼ層流状態と考えられる  $\bar{p} < 1$  気圧の実験値のみを用いて最小自乗法により算出した回帰直線である。この直線は、特に辺材において  $1/\bar{p}$  の小さい部分で実験値とのずれが見られ、乱流の影響が明らかである。また、(1-10) 式で明らかなように、この直線の  $1/\bar{p} = 0 \text{ cmHg}^{-1}$  における値は試験体の真の透過係数  $K$  である。この値は、乱流の影響を除かないときと明らかな差が認められる。このように、木材の透過性を測定しようとするとき乱流の発生しない条件下での測定が必要であることがわかる。

### 2.2.2 温度の影響

第1章で述べたように、気体の流動は実験温度  $T$  の影響を受ける。すなわち、図2-20(A)に示すように比流動体積  $V_p T / A \Delta P T'$  は  $\sqrt{T}$  に関して粘性流動を表わす双曲線と分子流を表わす直線との和で表わされ、また  $K_g$  は  $T$  に関して一次関係となる。そこで、木材の場合に気体流動と温度の関係を明らかにするために、厚さ4mmの辺材および心材試験体について  $\Delta P = 1 \text{ cmHg}$ 、 $t = 20$  および  $40^\circ\text{C}$  における乾燥空気の流動実験を行なった。比流動体積 -  $\bar{p}$  および  $K_g - 1/\bar{p}$  の関係は、図2-9および2-19に示した  $t = 30^\circ\text{C}$  の場合と同様に、いずれも乱流の影響を除いた回帰直線と実験値とのずれは比較的小さかった。そこで、これら3段階の温度条件に対して得られた比流動体積 -  $\bar{p}$  の乱流の影響を除いた回帰直線から同一の  $\bar{p}$  における比流動体積を算出した。これを  $\sqrt{T}$  に対してプロットしたのが図2-20(B)である。辺材および心材ともいずれの  $\bar{p}$  においても  $\sqrt{T}$  の増加に伴って比流動体積がわずかに低下する。  $20^\circ\text{C}$  から  $40^\circ\text{C}$  までの低下量は  $\bar{p}$  にかかわらず辺材の場合約5%、心材の場合約3%である。これは、図2-20(A)に示す関係曲線の緩かな低下部分に相当するものと思われる。

次に、 $K_g$  に対する温度の影響を明らかにするために、 $K_g - 1/\bar{p}$  の乱流の影響を除いた回帰直線から算出した  $K_g$  を  $T$  に対してプロットしたのが図2-

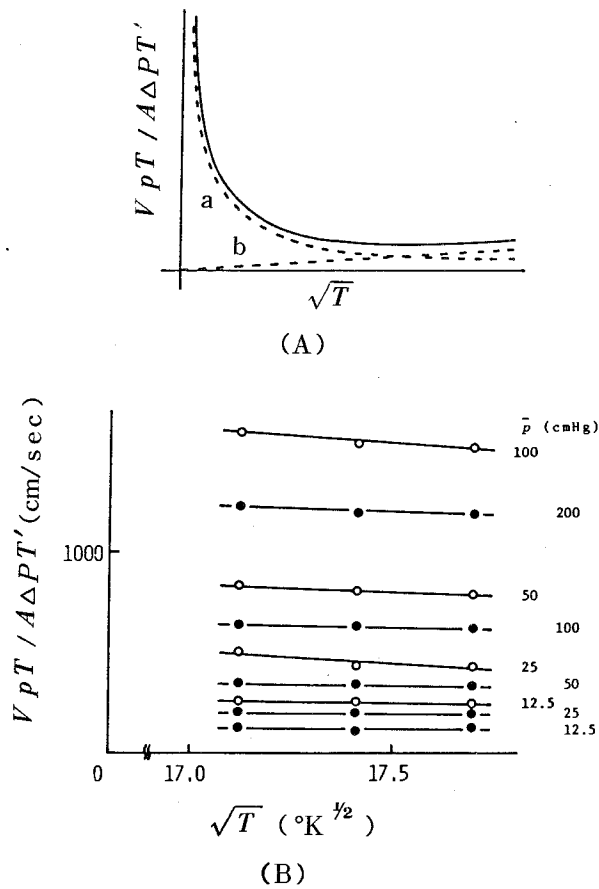


図 2 - 20 比流動体積 ( $V p T / A \Delta P T'$ ) と絶対温度の平方根 ( $\sqrt{T}$ ) の関係

(A) 理論曲線 ( $= a + b$ )

a : 粘性流動, b : 分子流

(B) 乾燥空気の実験曲線 (4 mm 厚ヒノキ円板状木口試験体,  $\Delta P = 1 \text{ cmHg}$ )

○ : 辺材, ● : 心材

21 である。辺材および心材とも  $K_g$  はいずれの  $\bar{p}$  においても  $T$  の増加に伴って直線的にわずかに増加する。これらの結果から, 木材中の気体流動は実験温度の影響を受けることが明らかである。しかし, 既往の木材透過性の研究においては実験温度の制御が行なわれていない場合が多かった。



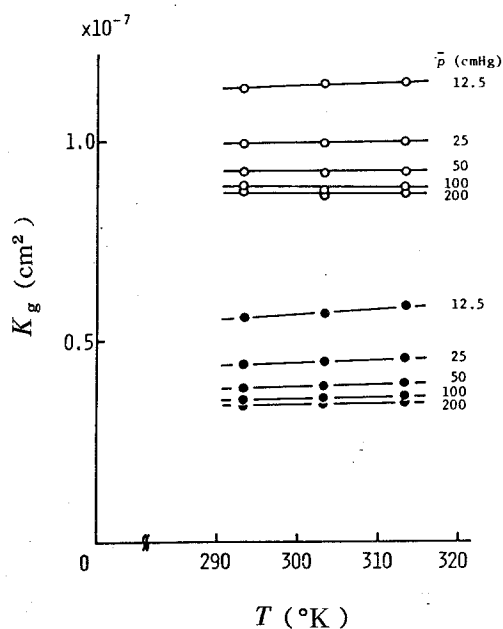


図 2 - 21 試験体の見掛けの気体透過係数 ( $K_g$ ) と絶対温度 ( $T$ ) の関係  
 (4 mm 厚ヒノキ円板状木口試験体,  $\Delta P = 1$  cmHg)  
 ○ : 辺材, ● : 心材

### 3 要 約

以上, 得られた結果を要約すると以下のようなものである。

#### 1. 壁孔膜小孔の定常流動阻害機能

(1) 針葉樹材樹軸方向の流動通路に, 孔径において対応する G F 模型での検討によって, 時間の経過に伴う水の流動体積  $V/A$  の低下の原因は, 液体中に混入している固体粒子, および通路内での急激な圧力低下によって液体中から発生した気泡が, 通路を閉鎖することであることが明らかとなった。

(2) ヒノキ辺材試験体での検討によって, 針葉樹材においてしばしば見ら

れる  $V/A$  の低下は、上記二つの要因による壁孔膜小孔の閉鎖が主要な原因であり、本実験の両端間圧力差  $\Delta P = 4.1 \text{ cmHg}$  では、トールスの移動による壁孔の通路の縮小は原因とはならないことが明らかとなった。

(3) 孔径  $0.01 \mu\text{m}$  のメンブランフィルターで液体中の固体粒子をあらかじめ除去し、液体の溶解空気量の小さい水頭法により、低い  $\Delta P$  で、ヒノキ辺材樹軸方向の流動実験を行なうとき、一定の  $V/A$  が得られることが明らかとなった。この条件を満たすとき同時に、 $V/A$  が流動方向の反転で影響を受けず、 $\Delta P$  に比例する、という定常層流に関する他の二つの条件が満足され、木材の透過性の測定、通路の定量化に必須な実験条件が整う。

## 2. 壁孔膜小孔の乱流発生機能

(1) ヒノキ辺材および心材樹軸方向における乾燥空気の流動実験により、特に壁孔膜小孔において、粘性流動に加えて分子流が生じ、 $\Delta P = 1 \text{ cmHg}$  では比流動体積  $V_p T / A \Delta P T'$  と平均圧力  $\bar{p}$  が一次関係で表わされることが明らかとなった。

(2) 辺材試験体の場合、 $\Delta P = 3$  および  $5 \text{ cmHg}$  ではこれらの一次関係にずれを生じ、特に  $\bar{p} > 1$  気圧で比流動体積が  $\Delta P$  の増加に伴って低下した。乱流の指標となる Reynolds 数  $R_e$  に比例する実際の流動体積  $V_p T / A \bar{p} T'$  と  $\bar{p}$  との積を考慮することによって、この低下は乱流の発生によることが明らかとなった。

(3)  $\bar{p} < 1$  気圧の実験値のみを用いて、乱流の影響を取り除くとき、辺材試験体の場合  $\Delta P = 3 \text{ cmHg}$  で  $R_e$  の臨界値が現われることが明らかとなった。このときの  $V_p T / A \bar{p} T'$  は約  $50 \text{ cm}^3/\text{sec}$  であり、これはこの試験体を水が流動するとき、水の流動体積  $V/A$  が約  $3.1 \text{ cm}^3/\text{sec}$  で乱流が発生することを示す。

(4) 木材中の通路を仮道管内こうだけから成るとしたとき、乱流の発生する  $V_p T / A \bar{p} T'$  は約  $5.5 \times 10^4 \text{ cm}^3/\text{sec}$  と算出され、上記の実測値と比

較するとき，通路に壁孔膜小孔があることによって極めて乱流が生じやすくなっていることがわかる。したがって，小さい流動体積で，小さい $\bar{p}$ の下で流動実験を行なうとき，層流状態が得られ，木材の気体透過性の測定が可能となる。

(5) 気体の流動は実験温度 $T$ の影響を受けることが明らかとなった。すなわち， $20 \sim 40^{\circ}\text{C}$ の温度範囲で，比流動体積は $\sqrt{T}$ の増加に伴って減少し，また $K_g$ は $T$ の増加に伴って増加した。

### 第3章 壁孔膜小孔の定量的評価と流動における寄与

針葉樹材の有縁壁孔膜小孔は、仮道管内こうに比べてその径が極めて小さい。そのために、物質の流動に大きな抵抗を生じるばかりでなく、第2章で明らかにしたように流動の非定常性の原因となる。したがって、このような壁孔膜小孔の大きさや数を明らかにすることは、木材中の流体流動の解明において重要である。壁孔膜小孔は主に乾燥材についてTEMによる観察<sup>5),77)~92)</sup>や、第1章で述べた種々の流体の流動実験<sup>2)</sup>による大きさや数の定量化がなされてきた。しかし、これらは定性的観察あるいは等価値を得るにとどまっている。さらに、壁孔膜は乾燥の際退行する水の表面張力によって種々の変化を受けることが知られている。<sup>89),93)~100)</sup>生材状態の辺材部では多くの壁孔膜は壁孔室の中央付近にあり、このような場合壁孔膜小孔が流動の支配因子となる。そこで、本研究では、壁孔膜小孔の孔径分布を明らかにし、流動に対する小孔の寄与を検討した。そのためにまず、生材状態を保持したヒノキおよびスギ辺材について、壁孔膜のレプリカのTEM写真の画像解析によって小孔の定量化を試みた。そしてさらに、数種の径の均一な球形粒子懸たく液の流動実験によって、流動に対する壁孔膜小孔の寄与を明らかにした。本章ではこれらの結果を論述する。

#### 1 画像解析法による壁孔膜小孔の定量的評価<sup>101)</sup>

壁孔膜小孔の定量化は従来種々の流動実験によってなされ、平均半径や最大半径等の等価値が得られてきた。しかし、壁孔膜のTEM写真で明らかのように、広い範囲の分布を持つ壁孔膜小孔径を一、二の等価値で評価することには問題があり、孔径分布を求める必要がある。そこで、壁孔膜小孔の孔径分布を

より直接的に求める方法として、凍結乾燥後作製した木材半径面のレプリカをTEM観察し、壁孔膜を拡大撮影した写真画像について画像解析法<sup>102),103)</sup>を適用した。画像解析法は、テレビカメラにより撮影した画像をモニター上に映し、画像のコントラストによって生ずる濃淡から一定の濃度レベルを設定し、測定する対象図形を切り出し、各種の値を測定するものである。コンピュータの使用により種々の測定を短時間でこなうことができるという利点を持つ。本実験の場合、壁孔膜のTEM写真画像において小孔を切り出し、個々の小孔について形状、径、面積等に関する各種物理計測値を求め、壁孔膜小孔の定量評価を行なった。本節ではその結果を論述する。

## 1.1 実験材料および方法

### 1.1.1 供試試料

供試試料には、京都大学演習林上賀茂試験地産の40年生ヒノキおよび35年生スギ供試木の、胸高位において互いに直交する4方向で採取した生長すいサンプルの最外層辺材を用いた。これらの試料について、1.1.2に記す方法で解析用画像を作製した。また、試料から得た木口切片の光学顕微鏡観察によって1年輪内の早材および晩材の仮道管数の比を、さらに試料を解繊して1仮道管当りの有縁壁孔数を測定した。

### 1.1.2 解析用画像の作製

前記4方向で採取した試料を、採取直後水中浸せきした後急速凍結し、アセトン・ドライアイス寒剤(約 $-86^{\circ}\text{C}$ )中に浸せきしたガラス容器内で凍結状態のまま2~3昼夜減圧乾燥した。乾燥後、割裂露出させた半径面(大きさ約 $5\text{mm}\times 7\text{mm}$ ,1方向当り4~5個)にPt-Pd蒸着を行ない、ダイレクト・カーボン・レプリカを作製した。このレプリカについて、日本電子製100C型TEMによって有縁壁孔膜を観察した(加速電圧100KV)。TEM観察した壁孔膜は大部分壁孔閉鎖を生じておらず、トールスは壁孔こうのほぼ中央にあった。中にはマルゴの一部が破壊しているものが見られた。そのような場

合，破壊しておらず，しかも破壊部の影響も受けていない部分（壁孔膜全体の22～38％）を撮影した。写真の撮影倍率を10,000倍とし，その際同時にTEM倍率検定用グレーティング（格子幅0.5 $\mu$ m）を撮影し，倍率の補正を行なった。各供試樹種について，1方向当り4～5半径面レプリカから早材10壁孔，晩材5壁孔を撮影した。そして，4方向計早材40壁孔，晩材20壁孔について得た約18,000倍の写真画像を解析に供した。

例示したヒノキ晩材壁孔膜のTEM写真（図3-1）で明らかなように，ミクロフィブリル束のすき間（壁孔膜小孔）に反対側の壁孔縁におけるいは状構

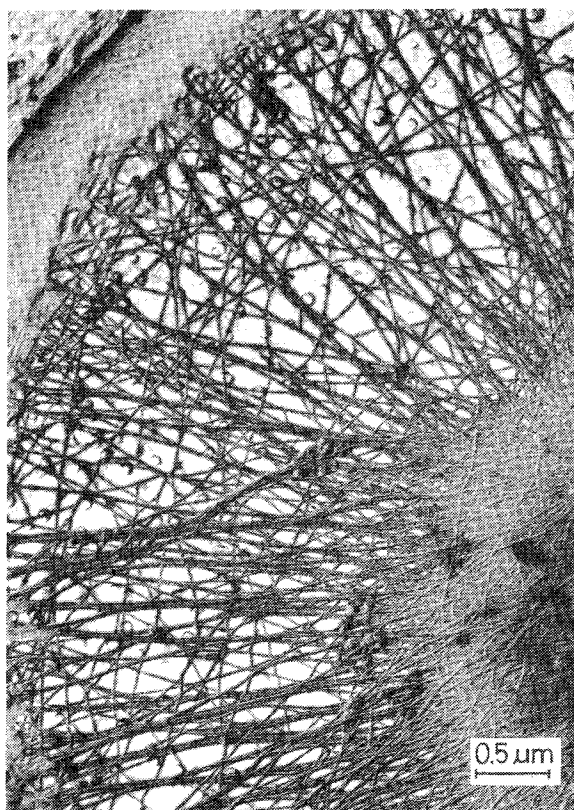


図3-1 ヒノキ辺材の晩材仮道管における有縁壁孔膜のTEM写真

造が観察される。このことは，壁孔膜の厚さ方向において重なり合っているミクロフィブリル束のすべてを写真画像にとらえていることを示す。

### 1.1.3 画像解析

壁孔膜のTEM写真画像を画像解析装置（島津ボシユロム・オムニコン3000）によって解析し，個々の壁孔膜小孔について表3-1に示す種々の物理計測値

表3-1 画像解析法により得た物理計測値および基本測定値の組み合わせ

物理計測値	基本測定値の組み合わせ
形状係数	
円形度	$4\pi \cdot \text{面積} / (\text{包絡周辺長})^2$
伸長度	最大長 / 最小幅
直径モード	
平均フェレー径	包絡周辺長 / $\pi$
円相当径	$(4 \cdot \text{面積} / \pi)^{1/2}$
平均弦長	$\pi \cdot \text{面積} / \text{包絡周辺長}$
最小幅	最小幅
面積	
面積	面積

を求めた。測定には1樹種当り60壁孔（早材40壁孔，晩材20壁孔）を供した。測定対象となった小孔数は両樹種とも早材約29,000，晩材約18,000であった。各種物理計測値の早材と晩材を合わせた相対度数，平均値，標準偏差等の統計量の計算は次の手順で行なった。すなわち，まず各画像について早材および晩材別に，実測データをマルゴの全面積に対する測定に供した面積の比によって，1個の壁孔当りのデータに換算した。他方，光学顕微鏡で求めた供試試料の早材：晩材の比率は，1仮道管当りの有縁壁孔数でヒノキ1：0.58，スギ1：0.75，1年輪内の仮道管数でヒノキ1：0.21，スギ1：0.66であった。したがって，1年輪内にある仮道管に含まれる有縁壁孔数の早材：晩

材の比はヒノキ 1 : 0.12 , スギ 1 : 0.50 となる。そこで、先に 1 壁孔当りに換算された早材と晩材のデータについてこの比率で重み付けを行なった。

本実験に画像解析法を適用するにあたっていくつかの問題点を含むと考えられるが、以下の理由によりこれらのうちの大部分はあまり問題とならない。(1) 壁孔膜の厚さ方向において重なり合ったマイクロフィブリル束の投影像を解析することになるため、同じ平面に含まれないマイクロフィブリル束の像によって細分された図形の計測値が得られる。しかし、壁孔膜の厚さ(約  $0.1^{47}) \sim 0.6 \mu\text{m}^{3)}$ ) と写真(図 3-1)で見られるマイクロフィブリル束の幅(約  $0.01 \sim 0.2 \mu\text{m}$ ) を考慮するとき、流体流動にかかわる径は投影像によって得られる小孔の径とはほぼ等価と考えられる。(2) 供試した両樹種はいずれも壁孔縁にいは状構造を持ち<sup>83)</sup>、この一部が濃度レベル設定に際して壁孔膜小孔の中空部として切り出され、測定値に多少の誤差を生じるおそれがある。しかし実際には、濃度レベルを設定したときほとんどのいは状構造は円周の一部だけが画像に残り、しかも完全な円となって現われることがないため、測定値にほとんど影響を及ぼさない。そこで、測定の能率化をはかるため、濃度レベル設定後に残留するいは状構造の像に対して特別の修正を行なわなかった。(3) Pt-Pd 蒸着によりマイクロフィブリル束が太くされることによって、小孔の大きさが縮小されることが考えられる。坂ら<sup>104)</sup>によると、この太りはマイクロフィブリル束の長軸方向と Pt-Pd のシャドウイングの方向の角度によって異なり、 $5 \sim 10 \text{ nm}$  の範囲である。壁孔膜小孔の形状に対する影響は小さいと考えられるが、小孔の径や面積の測定値にはこの分だけ真の値からのずれを生じる。しかし、このずれは必要に応じて補正することが可能である。(4) 壁孔膜の画像が写真面に対して傾いている場合、測定値はその角度  $\beta$  の余弦に相当する誤差を含むこととなる。しかし、その誤差は例えば  $\beta = 5^\circ$  のとき  $0.4 \%$  ,  $\beta = 10^\circ$  のとき  $1.5 \%$  であり、あまり大きくないと言える。



## 1.2 結果と考察

### 1.2.1 壁孔膜小孔の形状

図3-1で明らかなように、ほぼ直線であるマイクロフィブリル束で囲まれた壁孔膜小孔の形状は多角形である。そこで、これを数値化して評価するために形状係数として表3-1に示した円形度と伸長度を測定した。 $4\pi \times \text{面積} / (\text{包絡周辺長})^2$  で算出される円形度は壁孔膜小孔の円形の度合いを表わすもので、円の場合1で、そのほかの図形では1以下の値である。ここで、包絡周辺長とは図形のまわりに引いた糸の長さ、すなわち小孔の外周長さである。最大長/最小幅 で算出される伸長度は壁孔膜小孔の細長さを示すもので、1以上の値である。ここで、最大長とは小孔のまわりに引いた平行な2本の接線間の距離の最大値、最小幅とはその最小値である。

円形度について、ヒノキ辺材の早材および晩材における度数分布を図3-2に示す。図の棒グラフが相対度数、黒丸が相対累積度数を表わし、0.05ずつの級で示している。一点鎖線は平均値の位置を示し、 $m$ 、 $sd$  は平均値および

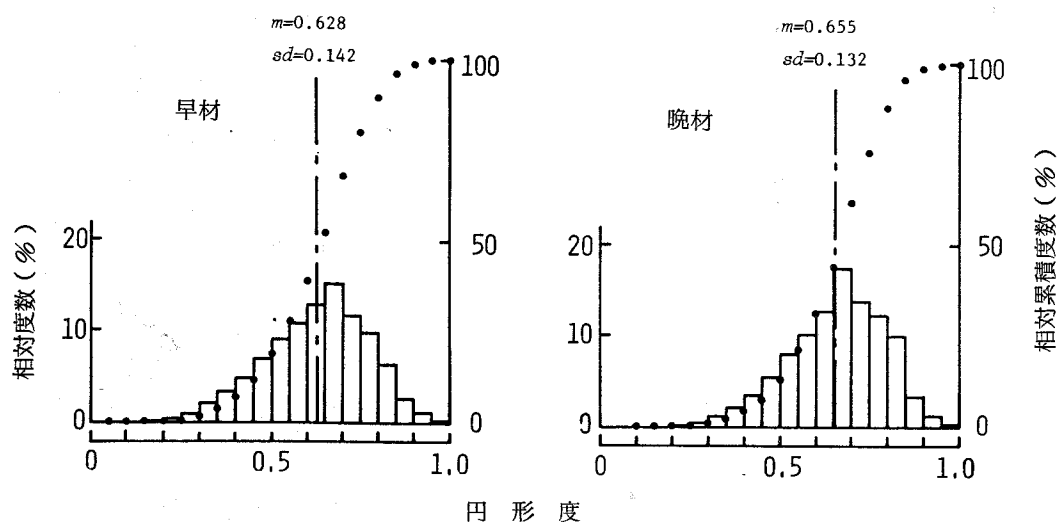


図3-2 壁孔膜小孔の円形度の分布(ヒノキ辺材)

$m$  : 平均,  $sd$  : 標準偏差

標準偏差である。円形度は広い分布を示し、早材と晩材で分布が極めて類似し、最大度数を示す級はいずれも  $0.65 \sim 0.70$  である。スギにおいても同様の傾向が見られ、早材では  $m = 0.647$  ,  $sd = 0.135$  , 晩材では  $m = 0.659$  ,  $sd = 0.127$  であった。

そこで次に、早材と晩材のデータに前述のような重み付けを行なって算出したヒノキおよびスギ辺材における壁孔膜小孔の円形度の度数分布を図 3-3 に示す。ヒノキとスギで分布の形は極めて類似し、最大度数を示す級はいずれも  $0.65 \sim 0.70$  である。

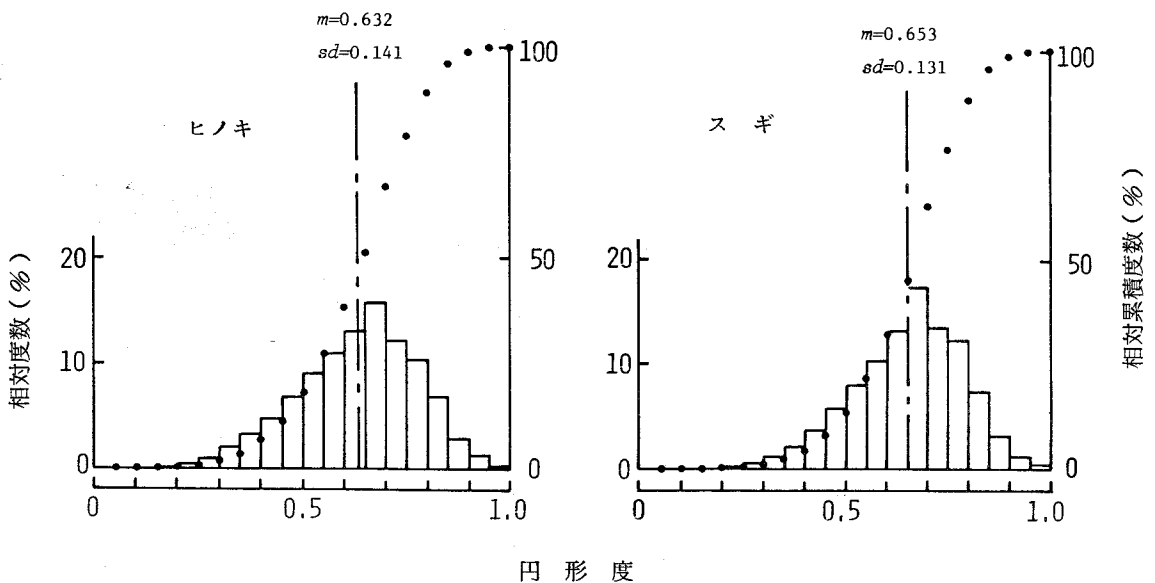


図 3-3 壁孔膜小孔の円形度の分布  
 $m$  ,  $sd$  : 図 3-2 に同じ

壁孔膜小孔の伸長度は、円形度の場合と同様に両樹種とも早材と晩材で極めて類似した分布を示し、最大度数を示す級も同一（ $2.0 \sim 2.5$  の級）であった。平均値および標準偏差はヒノキ早材  $m = 2.37$  ,  $sd = 0.96$  , 晩材  $m = 2.22$  ,  $sd = 0.85$  , スギ早材  $m = 2.25$  ,  $sd = 0.89$  , 晩材  $m = 2.22$  ,  $sd = 0.84$  であった。そこで、早材および晩材を含む両樹種の壁孔膜小孔の伸長度

の度数分布を図 3 - 4 に示す。ヒノキとスギで分布の形が極めて類似し、最大度数を示す級も同一（2.0 ～ 2.5 の級）である。

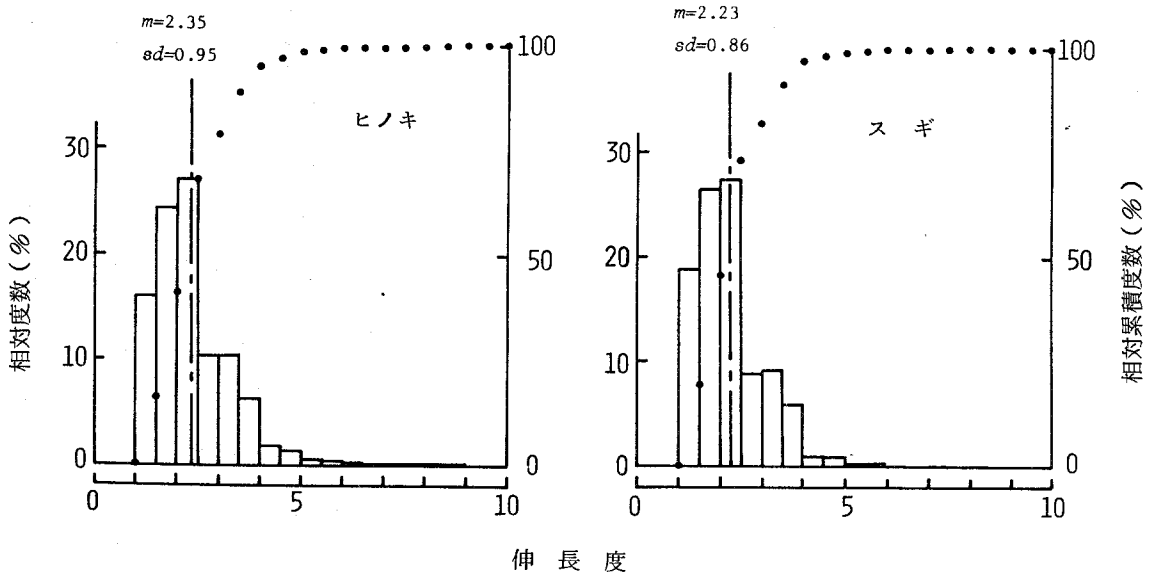


図 3 - 4 壁孔膜小孔の伸長度の分布  
 $m$ ,  $sd$  : 図 3 - 2 に同じ

以上の形状係数の検討から、壁孔膜小孔の形状は早・晩材間および供試した両樹種間で極めて類似することが明らかとなった。ここで、壁孔膜小孔の最大頻度の形状を類推するために、いくつかの簡単な図形（だ円，長方形，ひし形，鋭角および鈍角二等辺三角形）について円形度と伸長度を算出した。それらの関係を図 3 - 5 に示す。だ円は円（伸長度 1，円形度 1）から扁平となるにしたがって伸長度が大きくなり，円形度が小さくなる。長方形およびひし形はともに正方形（伸長度 1.41，円形度 0.785）から，2 種の二等辺三角形はともに正三角形（伸長度 1.15，円形度 0.605）から細長くなるにしたがって同様の傾向を示す。供試ヒノキとスギの伸長度および円形度の平均値と標準偏差をこの図に重ねて示すと，標準偏差の範囲にはかなり多様な形状が含まれるが，平均値はともに長方形とひし形に対する曲線の間中に位置する。このこと

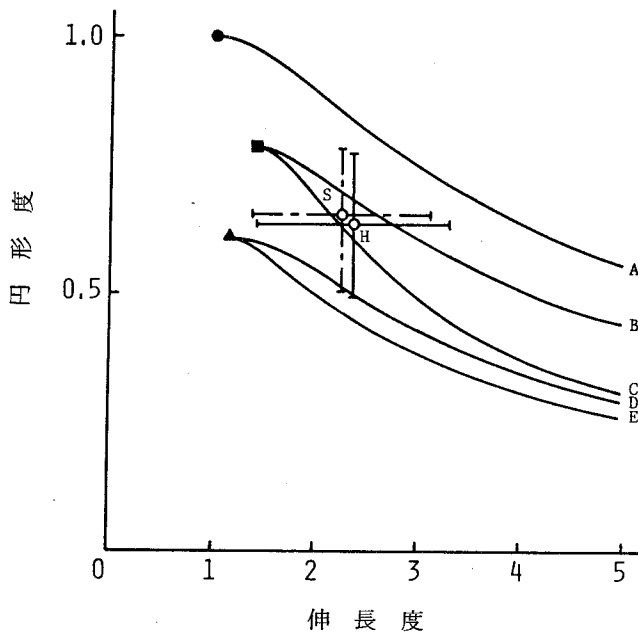


図 3 - 5 種々の簡単な図形の円形度と伸長度の関係

—○— : ヒノキにおける平均および標準偏差,

---○--- : スギにおける平均および標準偏差,

● : 円, ■ : 正方形, ▲ : 正三角形

A : だ円, B : 長方形, C : ひし形, D : 鈍角二等辺三角形, E : 鋭角二等辺三角形

は、両樹種における壁孔膜小孔はだ円に近い多角形から三角形にわたる多様な形状を含むが、最大頻度の形状は長方形ないしひし形に近い多角形であることを示唆する。

### 1. 2. 2 壁孔膜小孔の大きさ

壁孔膜小孔の大きさを定量評価するために、表 3 - 1 に示したように小孔の径に関係する数値として平均フェレー径、円相当径、平均弦長、最小幅を、また面積に関係する数値として各小孔の面積を測定した。包絡周辺長/ $\pi$  で算出される平均フェレー径は測定対象の小孔についてすべての方向に引いた平行 2 接線間の距離の平均値、 $(4 \times \text{面積} / \pi)^{1/2}$  で算出される円相当径は小孔

と等面積の円の直径を表わす値， $\pi \times \text{面積} / \text{包絡周辺長}$  で算出される平均弦長は小孔内のすべての方向に引いた弦の長さの平均値，最小幅は小孔に引いた平行2接線間の距離の最小の値である。ここで，最小幅は液体流動において壁孔膜小孔を閉鎖して定常流動の阻害要因となる固体粒子や気泡の大きさに関係する値である。これらの直径モードの値はこのような定義上の違いから同一の壁孔膜小孔に対しても当然異なる。例えば伸長度 2.3，円形度 0.69 の長方形の場合最小幅すなわち短辺の長さを  $B \mu\text{m}$  とすると，平均フェレー径  $1.96 B \mu\text{m}$ ，円相当径  $1.62 B \mu\text{m}$ ，平均弦長  $1.06 B \mu\text{m}$  となる。

供試ヒノキの早材および晩材における壁孔膜小孔の平均フェレー径の度数分布を図3-6に示す。横軸は対数軸であり，図中の一点鎖線は算術平均  $m$  の位

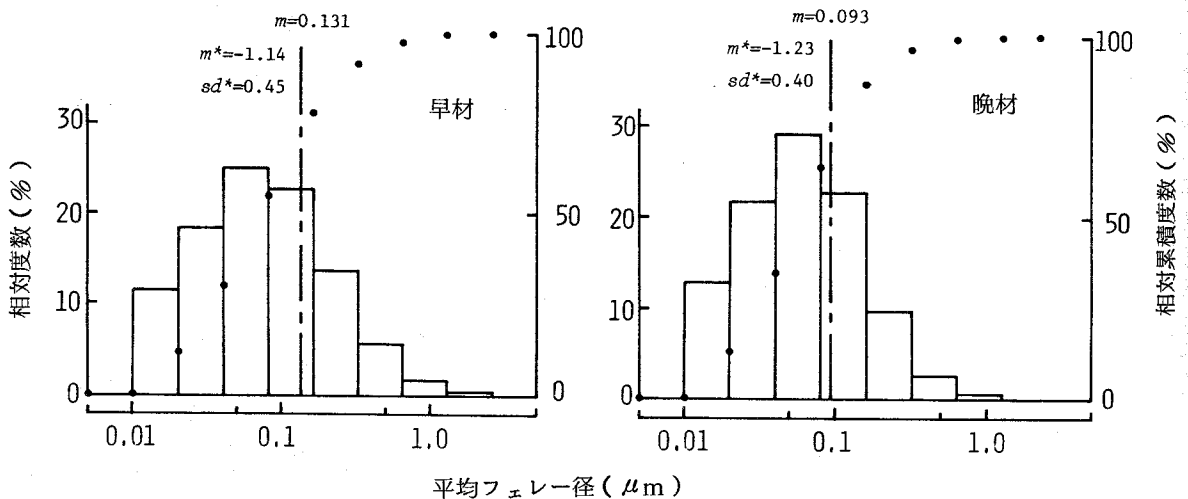


図3-6 壁孔膜小孔の平均フェレー径の分布(ヒノキ辺材)

$m$  : 平均,  $m^*$  : 径 ( $\mu\text{m}$ ) の対数値の平均,

$sd^*$  : 径 ( $\mu\text{m}$ ) の対数値の標準偏差

置を示し， $m^*$ ， $sd^*$  は径 ( $\mu\text{m}$ ) の対数値の平均および標準偏差である。壁孔膜小孔の平均フェレー径はほぼ3桁にわたって広く分布している。また，分布の形および  $sd^*$  から，晩材でやや鋭いピークの分布を示していることがわかる。

平均値は早材が晩材より大きい。スギにおいても同様の傾向が見られ、平均値は早材  $0.123 \mu\text{m}$  ( $m^* = -1.16$ ,  $sd^* = 0.45$ ), 晩材  $0.083 \mu\text{m}$  ( $m^* = -1.27$ ,  $sd^* = 0.39$ ) であった。また、他の直径モードについても同様の傾向が認められ、早材および晩材の平均値は円相当径がヒノキでそれぞれ  $0.084 \mu\text{m}$  ( $m^* = -1.26$ ,  $sd^* = 0.39$ ),  $0.065 \mu\text{m}$  ( $m^* = -1.33$ ,  $sd^* = 0.35$ ), スギで  $0.081 \mu\text{m}$  ( $m^* = -1.28$ ,  $sd^* = 0.39$ ),  $0.060 \mu\text{m}$  ( $m^* = -1.36$ ,  $sd^* = 0.34$ ), 平均弦長がヒノキで  $0.045 \mu\text{m}$  ( $m^* = -1.49$ ,  $sd^* = 0.36$ ),  $0.037 \mu\text{m}$  ( $m^* = -1.55$ ,  $sd^* = 0.33$ ), スギで  $0.044 \mu\text{m}$  ( $m^* = -1.51$ ,  $sd^* = 0.36$ ),  $0.035 \mu\text{m}$  ( $m^* = -1.58$ ,  $sd^* = 0.32$ ), 最小幅がヒノキで  $0.064 \mu\text{m}$  ( $m^* = -1.38$ ,  $sd^* = 0.39$ ),  $0.051 \mu\text{m}$  ( $m^* = -1.44$ ,  $sd^* = 0.36$ ), スギで  $0.064 \mu\text{m}$  ( $m^* = -1.38$ ,  $sd^* = 0.40$ ),  $0.048 \mu\text{m}$  ( $m^* = -1.47$ ,  $sd^* = 0.36$ ) であった。

供試ヒノキおよびスギについて、四つの直径モードの度数分布を図3-7に示す。横軸はすべて対数軸である。いずれもほぼ3桁にわたる広い分布を示し、対数正規分布に近いことがわかる。各モードの平均値はヒノキがスギよりやや大きい。また、これらの値は第1章で述べた種々の流体の流動実験により得られた壁孔膜小孔径の等価値<sup>2)</sup>と同じオーダーの大きさである。しかし、前述のように各モードの定義の違いにより直径モード間では明らかな差が見られる。したがって、壁孔膜小孔径を定量評価する際どのような直径モードによるのが妥当であるかは検討を要し、目的に応じて測定項目を選択する必要がある。例えば、円形以外の形状の断面を持つ管における流動を考えると、円形断面における直径のかわりに 断面積/周辺長 で算出される水力平均深さ ( $hmd$ ) の4倍、すなわち  $4 hmd$  が用いられる。

供試ヒノキおよびスギの早材および晩材における壁孔膜小孔の面積はいずれもほぼ4桁にわたる広い分布を示した。平均値はヒノキ早材  $0.0130 \mu\text{m}^2$  ( $m^* = -2.47$ ,  $sd^* = 0.67$ ), 晩材  $0.0069 \mu\text{m}^2$  ( $m^* = -2.61$ ,

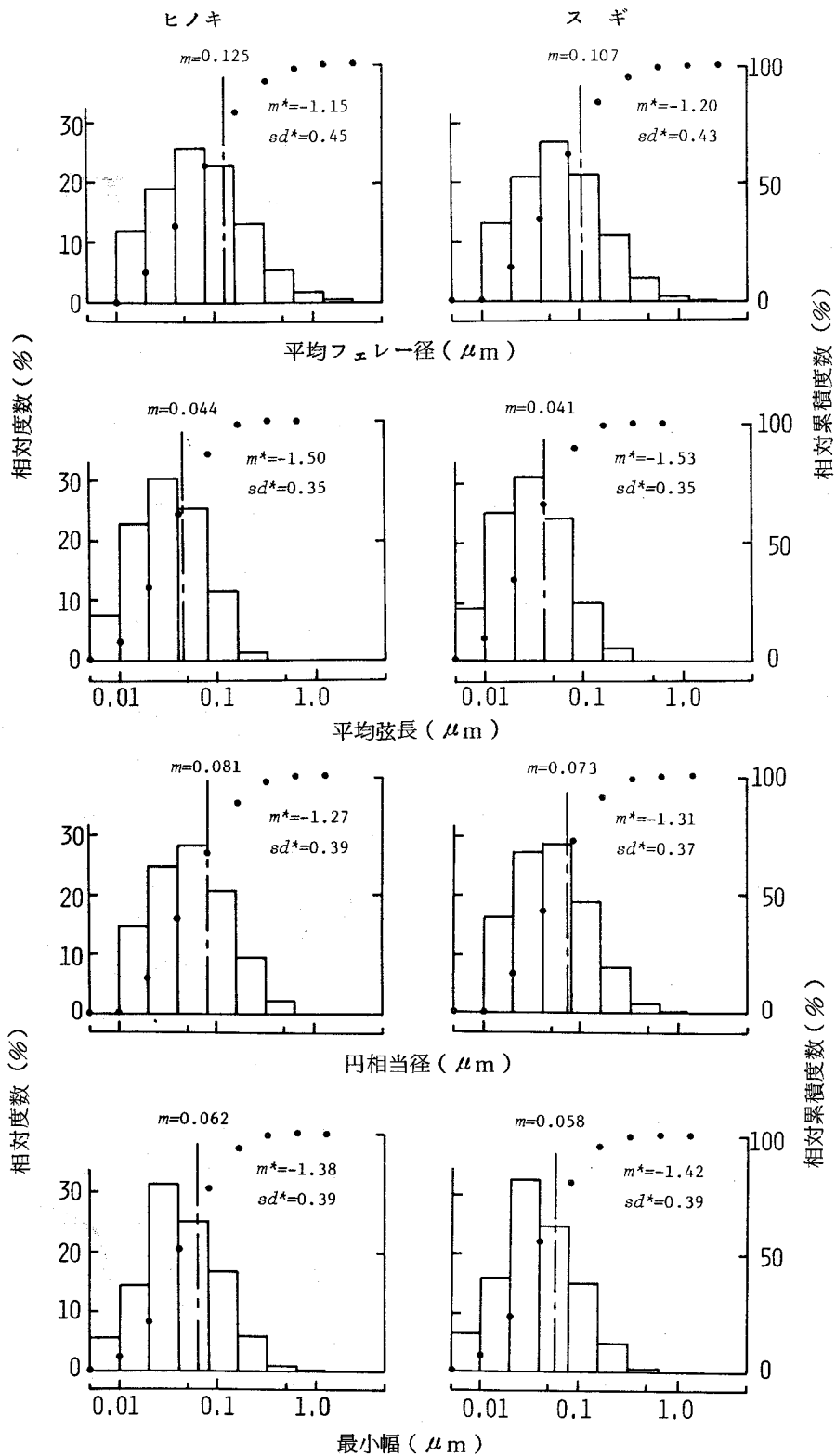


図 3 - 7 壁孔膜小孔の四つの直径モードの分布

$m$ ,  $m^*$ ,  $sd^*$  : 図 3 - 6 に同じ

$sd^* = 0.59$ ), スギ早材  $0.0124 \mu m^2$  ( $m^* = -2.50$ ,  $sd^* = 0.67$ ), 晩材  $0.0061 \mu m^2$  ( $m^* = -2.65$ ,  $sd^* = 0.58$ )であり, 両樹種とも早材が晩材よりやや大であった。次に, ヒノキとスギにおける壁孔膜小孔の面積の度数分布を図3-8に示す。横軸は対数軸である。両樹種ともほぼ4桁にわ

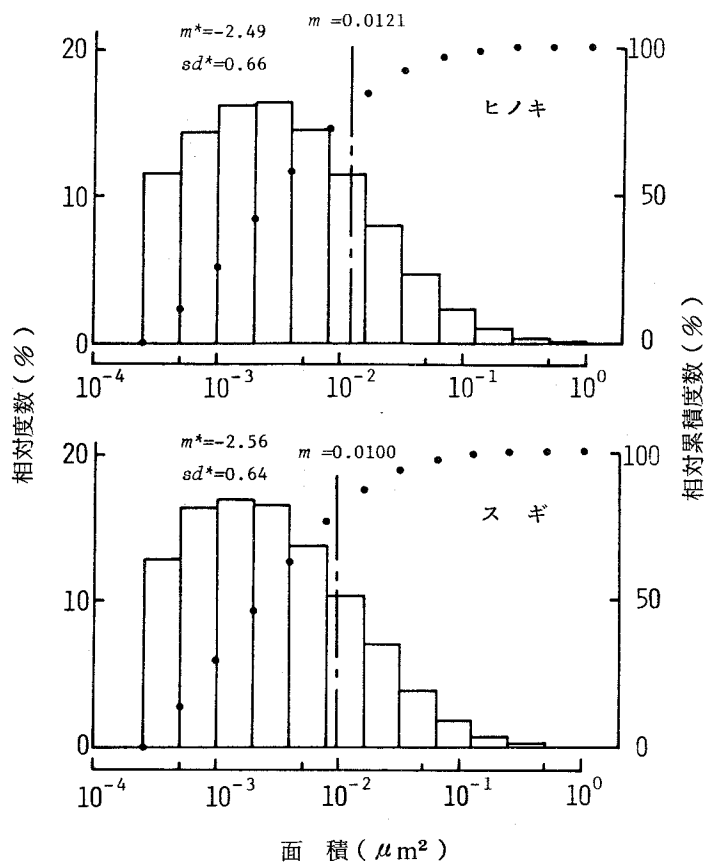


図3-8 壁孔膜小孔の面積の分布  
 $m$ ,  $m^*$ ,  $sd^*$ : 図3-6に同じ

たる広い分布を示し, 平均値はヒノキがスギよりやや大きい。

このように, 供試試料の壁孔膜小孔の大きさはほぼ対数正規分布に近い広い分布を示し, 平均値において早材が晩材より, また供試ヒノキがスギよりやや



大であることが明らかとなった。

## 2 壁孔膜小孔における流動体積の分布<sup>105),106)</sup>

壁孔膜小孔の孔径分布が前述のように明らかとなった。そこで、このような分布を持つ壁孔膜小孔を流体が流動するとき、どのような流動体積の分布を示すかを明らかにし、各大きさの小孔が流動に対してどのような寄与をするかを検討した。このために、生材状態から一度も乾燥させることなく水中に保存したヒノキおよびスギの未乾燥材について、粒径が均一な数種の粒子懸たく液の流動実験を行なった。すなわち、第2章で明らかにしたように液体流動で気泡や固体粒子等の影響や乱流のない定常層流状態の実験条件において、粒径が均一で木材実質と吸着等の相互作用を持たない数種類の球形粒子をそれぞれ単独にろ過蒸留水に分散させた懸たく液の流動実験を行なった。本実験において、懸たく粒子はそれより孔径の小さい壁孔膜小孔を単に物理的に閉鎖し、流動に有効な小孔数を減少させる。その結果、粒子を加えないろ過蒸留水の場合に比べて流動体積を低下させる。そして、粒子より小さい小孔が粒子によってすべて閉鎖されるとき、懸たく液の流動体積は一定値となる。

ここで、ろ過蒸留水での試験体単位断面積当りの流動体積を  $Q_i$  (cm/sec), 次に流動液体を粒径  $d$  ( $\mu\text{m}$ ) の粒子懸たく液としたときに一定となったそれを  $Q(d)$  (cm/sec) とする。このとき、その差  $Q_i - Q(d)$  は用いた粒子の直径  $d$  より孔径の小さい壁孔膜小孔における流動体積を表わすことになる。前節で明らかにしたように、壁孔膜小孔はだ円に近い多角形から三角形にわたる多様な形状を持つ。したがって、小孔に引掛かった球形粒子も小孔を完全に閉鎖することはできず、すみに小さいすき間を残すと考えられる。しかし、Hagen-Poiseuille 則から流動体積は毛管径の4乗に比例するので、これらの小さなすき間における流動の全流動体積に対する寄与は極めて小さい。そこで、壁孔

膜小孔の孔径を  $D(\mu\text{m})$  とするとき、粒径  $d$  の粒子は  $D \leq d$  の小孔を閉鎖すると仮定する。このとき、次式で示す試験体単位断面積当りの累積流動体積  $Q_c(D)(\text{cm}^3/\text{sec})$  を定義すると、 $Q_c(D)$  は孔径が  $D$  より小さい壁孔膜小孔を通る水の流動体積を表わすことになる。

$$Q_c(D) = Q_i - Q(d) \quad \dots\dots\dots (3-1)$$

ところで、(3-1)式で得られる  $Q_c(D)$  は、ある孔径  $D$  の一つの小孔における単位時間当りの流動体積  $q(D)(\text{cm}^3/\text{sec})$  とその試験体単位断面積当りの壁孔膜小孔径の分布関数  $\phi(D)(\text{cm}^{-3})$  との積を孔径 0 から  $D$  まで積分した値である。

$$Q_c(D) = \int_0^D \phi(D) \cdot q(D) dD \quad \dots\dots\dots (3-2)$$

いま、仮道管内こう一壁孔膜小孔の直列通路において、流動が層流状態であり、仮道管内こうの流動抵抗が無視できると仮定し、粘性流動に対する Hagen-Poiseuille 式((1-2)式)を適用すると、次式が成り立つ。

$$Q_c(D) = a \cdot \Delta P \cdot \int_0^D \phi(D) \cdot D^4 dD \quad \dots\dots\dots (3-3)$$

ここで、 $a$  : 壁孔膜厚さ ( $0.15 \mu\text{m}^{46}$ ) と仮定) および流動液体の粘性係数に  
関係する定数 ( $\text{cm}^{-1} \cdot \text{sec}^{-1} \cdot \text{cmHg}^{-1}$ )。

ただし、試験体両端間の圧力差  $\Delta P(\text{cmHg})$  は壁孔膜両端間の圧力差に等しいと仮定する。(3-2)および(3-3)式を微分すると次式となる。

$$\frac{dQ_c(D)}{dD} = \phi(D) \cdot q(D) = a \cdot \Delta P \cdot \phi(D) \cdot D^4 \quad \dots\dots (3-4)$$

(3-4)式は、 $dQ_c(D)/dD$  がある孔径  $D$  を持つすべての壁孔膜小孔における流動体積の総和を表わすことを示し、種々の  $D$  について  $dQ_c(D)/dD$  を求めるとき壁孔膜小孔の流動体積の分布曲線が得られる。したがって、いま

数種の粒径の粒子懸たく液の流動実験を行ない，それぞれの流動体積が得られるとき，それらの  $Q_c(D)$  を  $D$  で図上微分することにより，壁孔膜小孔における流動体積の分布が得られることになる。

さらに，(3-4)式を書き換えると次式となり，壁孔膜小孔の分布関数  $\phi(D)$  が得られる。

$$\phi(D) = \frac{d Q_c(D) / d D}{a \cdot \Delta P \cdot D^4} \quad \cdots \cdots \cdots (3-5)$$

(3-5)式は， $d Q_c(D) / d D$  の値とそれを得た  $D$  の値から壁孔膜小孔の孔径分布曲線が得られることを示す。本実験では，数種の粒子懸たく液の流動実験を順次行ない，上記の考え方にに基づき壁孔膜小孔における流動体積の分布およびそれから得られる孔径分布を算出した。そして，前述の画像解析法による結果と対比して流動に対する壁孔膜小孔の寄与を検討した。本節ではそれらの結果を論述する。

## 2.1 実験材料および方法

### 2.1.1 供試材料

供試材には，伐採直後から試験体作製時まで未乾燥状態に保持した奈良県吉野産のヒノキおよびスギ各3樹体の胸高位における円板を用いた。そのうちヒノキ，スギ各1樹体（ヒノキⅠ，スギⅠとする）は髄を通り互いに直交して四分割した辺材（Ⅰ-1～Ⅰ-4部位とする）から，他の各2樹体は北向位置における辺材（ヒノキⅡ，ⅢおよびスギⅡ，Ⅲとする）から試験体を採取した。また，壁孔膜小孔への懸たく粒子の閉鎖状態のTEM観察に，京都大学演習林上賀茂試験地産のスギ辺材を用いた。これらの供試材から，直径約15mmで，流動方向に少なくとも1個の壁孔対を含むように繊維方向厚さが最大仮道管長程度の4mmの円板状木口試験体を，樹軸方向に連続して樹体Ⅰについては各部位6個あて，樹体Ⅱ，Ⅲについては3個あて作製した。木口面はマイターソー仕

上げによった。これらの試験体を実験直前まで 0.2 % デヒドロ酢酸ナトリウム水溶液中に浸せきし、防腐保存した。これらの試験体の容積密度はヒノキⅠ, Ⅱ, Ⅲがそれぞれ平均 0.35, 0.36, 0.35 g/cm<sup>3</sup>, スギⅠ, Ⅱ, Ⅲが 0.34, 0.30, 0.32 g/cm<sup>3</sup>, 平均年輪幅はヒノキがそれぞれ 0.12, 0.15, 0.12 cm, スギが 0.14, 0.18, 0.16 cm であった。また、これらの試料について、木口切片の光学顕微鏡観察によって単位断面積当りの仮道管数を、解繊して 1 仮道管当りの壁孔数を測定した。流動実験に先立ち、試験体をろ過蒸留水で飽和し、同時に残存気泡を取り除くために、煮沸および水中下での減圧により脱気処理を行なった。

### 2.1.2 流動液体

流動液体には、第 2 章で明らかとなったように、時間の経過に伴う流動体積の低下の主要な原因の一つである水中の固体粒子を取り除くために、孔径 0.01  $\mu\text{m}$  メンブランフィルターでろ過を行なった新しい蒸留水を用いた。そして、このろ過蒸留水に壁孔膜小孔径の範囲に対応すると考えられる粒径  $d = 0.087 \pm 0.0046$ ,  $0.126 \pm 0.0043$ ,  $0.176 \pm 0.0023$ ,  $0.234 \pm 0.0026$ ,  $0.357 \pm 0.0056 \mu\text{m}$  のスチレン・ブタジエン共重合体またはポリスチレンの Dow 社製ユニフォーム・ラテックス球形粒子を、それぞれ流動に対する粘度効果が問題とならない濃度で分散させた懸濁液を用いた。これらの粒子は水中で負の電荷を帯び、またスチレン・ブタジエン共重合体およびポリスチレンは水素結合を生ずる基を持たない。さらに、それらの溶解度パラメーターはそれぞれ 8.0 ~ 8.7, 8.5 ~ 10.3 (cal/cm<sup>3</sup>)<sup>1/2</sup>, セルロースのそれは 15.65 (cal/cm<sup>3</sup>)<sup>1/2</sup> であり<sup>107)</sup> セルロースとの間の相互作用は小さく、木材との吸着は考えられない。また、粒子は剛球と仮定したが、流動液体の圧力による粒子の圧縮ひずみは用いた圧力範囲内で  $10^{-3} \sim 10^{-6}$  strain であり、仮定は十分成立すると考えられる。流動実験に用いた懸濁液の濃度は粒径の小さいものから順に  $6.0 \times 10^{-9}$ ,  $1.8 \times 10^{-8}$ ,  $4.8 \times 10^{-8}$ ,  $1.1 \times 10^{-7}$ ,  $4.2 \times 10^{-7}$  g/ml である。これらの濃度では懸濁液中の粒子数はすべて約

$1.6 \times 10^7$  個/ml, 粒子間平均距離は約  $40 \mu\text{m}$  である。

### 2.1.3 流動実験装置

第2章で、液柱の静水圧で液体を流動させる水頭法により低い  $\Delta P$  で木材試験体中の流動実験を行なうとき、定常層流条件が満足されることを明らかにした。そこで、本節の粒子懸たく液の流動実験は水頭法によることとした。実験装置は貯水槽の数を増した以外は図2-1の水頭法の場合と同じである。ただし、ヒノキⅠおよびスギⅠについての流動実験には、装置中のラインおよび試験体保持セルをステンレス製からガラス製に換え、ライン内での水の流動状態を観察できるようにした。この観察結果によると、試験体近傍で気泡の発生や流動の乱れ等が認められず、試験体内の水の流動は層流状態であることが示唆された。液体の圧力は水銀マンオメーターで精度  $\pm 0.02 \text{ cmHg}$  で測定し、ニードルバルブで  $\Delta P$  を一定に保持した。 $\Delta P$  はヒノキⅠ, ⅡおよびスギⅠでは  $1 \text{ cmHg}$  , その他は  $2 \text{ cmHg}$  である。このように  $\Delta P$  を異にしたのは、透過性の低い試験体について流動体積の測定精度を高めるためである。流動体積  $V (\text{cm}^3/\text{sec})$  は、ヒノキⅠ, スギⅠの場合には一定体積の液体の流出に要する時間を、その他の場合にはメスシリンダーで1あるいは5分間に流出する液体の体積を測定して求めた。これらの測定精度は体積測定に用いたメスシリンダーの種類により、それぞれ  $0.01 \sim 0.005$  ,  $0.008 \sim 0.002 \text{ cm}^3/\text{sec}$  である。そして、流動方向に直交する試験体単位断面積当り、単位時間当りの液体流動体積  $V/A (\text{cm}^3/\text{sec})$  を算出した。試験体をほとんど空気に直接ふれさせることなく、すばやく試験体保持セルに取り付けた後、これを  $30 \pm 0.1^\circ\text{C}$  の恒温水槽内に置き、試験体および流動液体の温度を一定に保った。

また、懸たく粒子が壁孔膜小孔を閉鎖している様子を、次のように作製したレプリカについてTEMにより観察した。すなわち、粒径  $0.176 \pm 0.0023 \mu\text{m}$  の粒子懸たく液を流動させた後のスギ辺材試験体を急速凍結し、これをアセトン・ドライアイス寒剤(約  $-86^\circ\text{C}$ )中に浸せきしたガラス容器内で凍結状態のまま2~3昼夜減圧乾燥した。乾燥後、割裂して露出させた半径面に

Pt-Pd 蒸着を行ない，ダイレクト・カーボン・レプリカを作製した。観察は日本電子製 100 C 型 TEM によった。

## 2.2 結果と考察

### 2.2.1 懸だく液の流動

ヒノキ辺材試験体について， $\Delta P = 1$  cmHg ではじめに 0.01 M F でろ過した蒸留水，ついで径  $0.087 \mu\text{m}$  の粒子懸だく液，さらに再びろ過蒸留水を流動させた後，流動方向を反転した一連の実験における  $V/A$  の経時変化を図 3-9 に示す。 $V/A$  ははじめにろ過蒸留水で一定であるが，懸だく液の流動

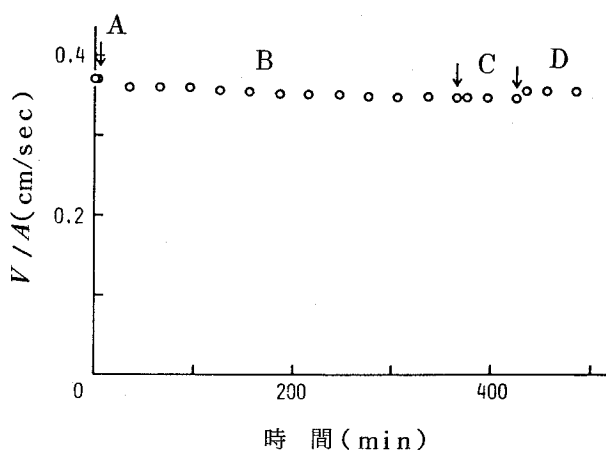


図 3-9 水の流動体積 ( $V/A$ ) の経時変化 (ヒノキ辺材,  $\Delta P = 1$  cmHg)

A : ろ過蒸留水, B : 粒径  $0.087 \mu\text{m}$  粒子懸だく液,  
C : ろ過蒸留水, D : 流動方向の反転

後徐々に低下し，水の約 94 % で新たな一定値となる。再度の蒸留水の流動においても  $V/A$  に変化がない。前述のように粒子と木材実質との吸着は考えられず，また水に対する懸だく液の相対粘度は 1.00 であり， $V/A$  に及ぼす効果は全く考えられない。これらのことは，懸だく液の一定となった  $V/A$  がそ

の後再度のろ過蒸留水の流動によって変らないことでも裏付けられる。しかも、ヒノキ辺材のまさ目切片の光学顕微鏡測定による有縁壁孔の壁孔口の平均直径が早材  $4.6 \pm 0.7 \mu\text{m}$  , 晩材  $1.3 \pm 0.5 \mu\text{m}$  であったので、径  $0.087 \mu\text{m}$  の懸だく粒子が壁孔口を閉鎖することは考えられない。また、仮道管と放射柔細胞の間の半縁壁孔膜はヒノキの場合無孔<sup>90)</sup>とされ、これを通しての水の流動は極めて小さい。したがって、これらのことから懸だく液の流動の際の  $V/A$  の低下は、粒子が壁孔膜小孔を単に物理的に閉鎖して有効な通路の数と断面積を減少したことによるものである。そして、その後  $V/A$  が一定値となるのは懸だく粒子の粒径以下の小孔がすべて閉鎖されて平衡状態となったためであると考えられる。さらに、流動方向の反転で  $V/A$  がわずかに増加し、その後はほぼ一定値（初期の水の  $V/A$  の約 96%）を示している。これは次のように考えられる。すなわち、反対方向からの水の流動によって壁孔膜小孔を閉鎖していた粒子が容易に引き離され、その小孔が再び通路として有効となる。さらに、流動通路に壁孔が二つ以上ある確率が小さいため引き離された粒子が再び直列にある別の壁孔の小孔を閉鎖することが少なかったためである。なお、これら一連の実験における  $V/A$  から見て、1 仮道管内こうを 1 分間に通過する粒子数は約 1,900 個であり、また粒子間平均距離は約  $40 \mu\text{m}$  である。このことから、粒子が積み重なった状態で壁孔膜小孔を閉鎖する可能性は小さいと思われる。

粒子が壁孔膜小孔を閉鎖している様子を示す TEM 写真を図 3-10 に示す。写真において、やや大きめの黒く見える円形の像が粒子である。粒子がそれより小さい壁孔膜小孔に引掛かっている様子が部分的に観察される。しかし、流動実験を終了した試験体に凍結、乾燥、割裂および蒸着などの種々の操作が加えられている。したがって、これらの操作によって、壁孔膜に単に付着し小孔を閉鎖していた粒子の多くが撮影時には脱落してしまったものと思われ、この写真は流動実験で壁孔膜小孔を閉鎖する粒子の様子を示し得たものではない。

以上の予備検討結果に基づいて、ヒノキおよびスギそれぞれの I ~ 1 ~ I -

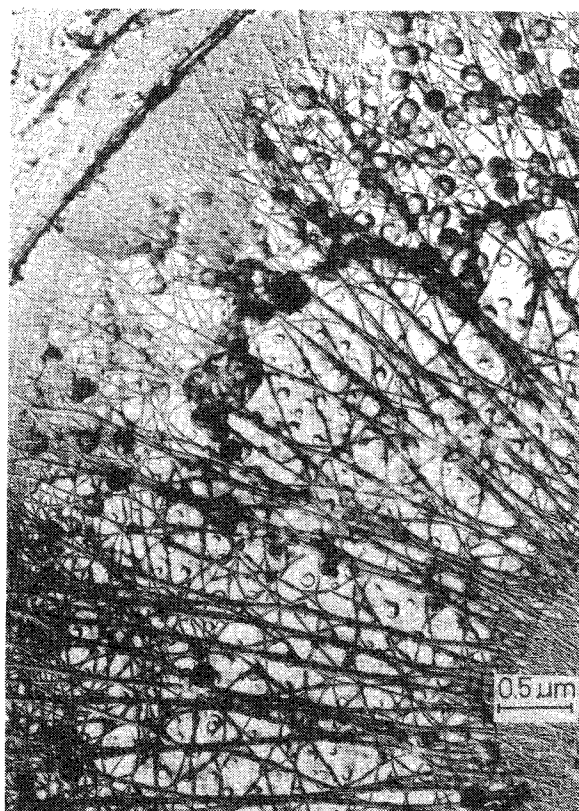


図 3 - 10 粒子懸だく液（粒径  $0.176 \mu\text{m}$ ）流動後のスギ辺材の早材仮道管における有縁壁孔膜の TEM 写真  
黒い円形の像が懸だく粒子

4 の各連続 6 試験体，ヒノキおよびスギⅡ，Ⅲの各連続 3 試験体について，前述の数種類の粒子懸だく液の流動実験を行なった。すなわち，はじめにろ過蒸留水，ついで粒径  $d$  が最小の懸だく液，以下，順次大きい粒径の懸だく液を用い，同一試験体について一つの液体の  $V/A$  が一定となった後，次の液体の流動実験を開始した。この際，10 あるいは 60 分間にわたって  $V/A$  に変化がないとき，一定値に達したものとした。ヒノキⅠについて  $V/A$  の経時変化の一例を図 3 - 11 に示す。



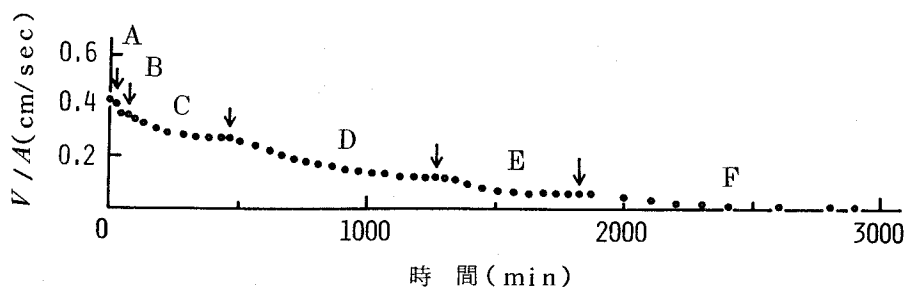


図 3 - 11 水および粒子懸たく液の流動体積 ( $V/A$ ) の経時変化  
(ヒノキ I,  $\Delta P = 1 \text{ cmHg}$ )

A : ろ過蒸留水, B, C, D, E, F : 粒径  $0.087, 0.126, 0.176, 0.234, 0.357 \mu\text{m}$  の粒子懸たく液

## 2.2.2 流動体積分布曲線

ヒノキおよびスギの胸高位円板 4 部位における試料 I - 1 ~ I - 4 について, 孔径が  $D$  より小さい小孔を通る流動体積を表わす累積流動体積  $Q_c(D)$  ( $\text{cm/sec}$ ) の平均値を  $D$  に対してプロットした (図 3 - 12)。図中の横線はろ過蒸留水の

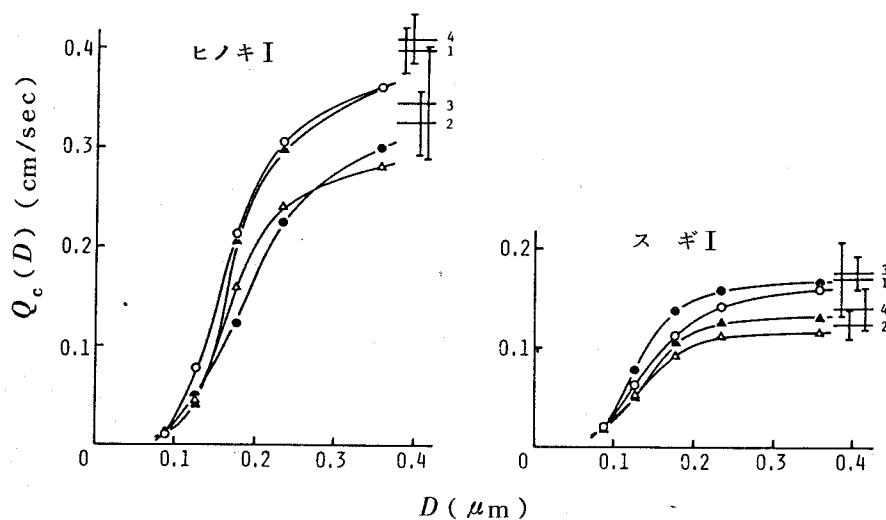


図 3 - 12 水の累積流動体積 ( $Q_c(D)$ ) と孔径 ( $D$ ) の関係

○ : 1 部位, △ : 2 部位, ● : 3 部位, ▲ : 4 部位

十 : ろ過蒸留水の流動体積 ( $Q_i$ ) の平均値および標準偏差

での初期の流動体積  $Q_i$  の平均値と標準偏差の範囲を表わす。ヒノキ、スギとも  $Q_i$  および  $Q_c(D)$  は部位間で差が見られる。しかし、 $Q_i$  の平均値と標準偏差の範囲からわかるように、これらの値は同一部位内でかなりの変動を示し、分散分析による有意差検定では両樹種とも部位間で有意の差は認められなかった。

そこで次に、ヒノキおよびスギⅡ、Ⅲにおける結果を、樹体Ⅰの全試験体の平均値とともに図3-13に示す。ただし、これらは実験精度を整えるために

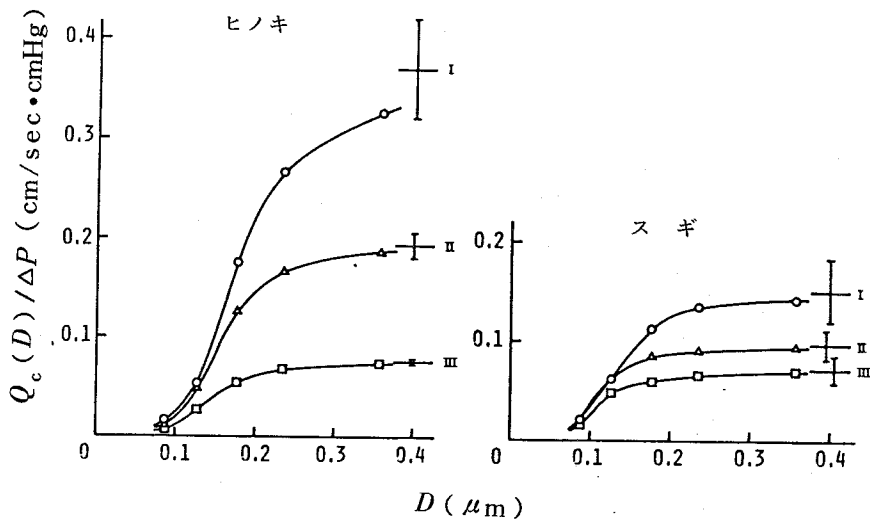


図3-13 水の単位圧力差当りの累積流動体積 ( $Q_c(D)/\Delta P$ ) と孔径 ( $D$ ) の関係

○：樹体Ⅰ， △：樹体Ⅱ， □：樹体Ⅲ

±：ろ過蒸留水の単位圧力差当り流動体積 ( $Q_i/\Delta P$ ) の平均値および標準偏差

異なる  $\Delta P$  で流動実験を行なったものであり、比較を容易にするため単位  $\Delta P$  当りの  $Q_c(D)$ ，すなわち  $Q_c(D)/\Delta P$  を算出し、これを  $D$  に対してプロットした。ヒノキ、スギとも樹体間で  $Q_i/\Delta P$  および  $Q_c(D)/\Delta P$  に有意な差が見られる。

次に、 $Q_i/\Delta P$  を 1.0 としたときの各  $D$  における  $Q_c(D)/\Delta P$  の割合、 $Q_c(D)/Q_i$  を  $D$  に対して図示した (図 3 - 14)。樹体間で  $Q_c(D)/\Delta P$  に大きな

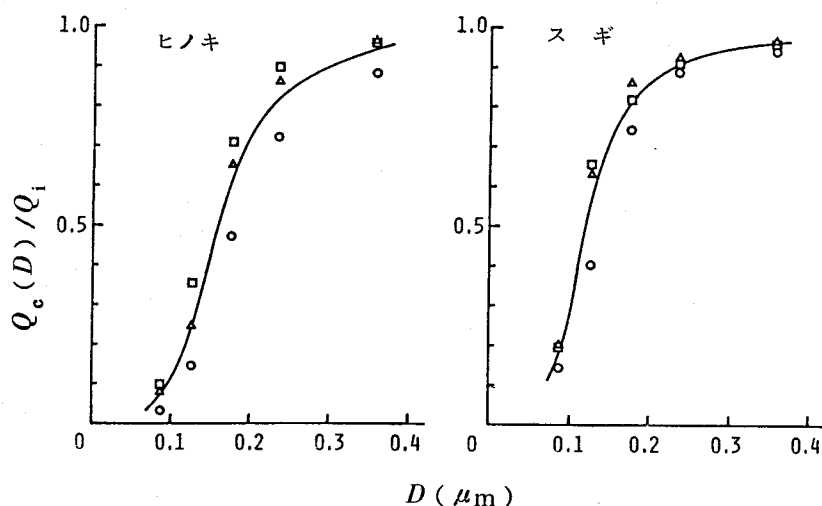


図 3 - 14 ろ過蒸留水の流動体積に対する累積流動体積の割合  
( $Q_c(D)/Q_i$ ) と孔径 ( $D$ ) の関係  
○, △, □ : 図 3 - 13 に同じ

差が見られたにもかかわらず、 $Q_c(D)/Q_i$  ではあまり差がなく、測定点はほぼ同一曲線上にのる。この曲線は、急激な立ち上がりをもヒノキでは  $D = 0.1 \sim 0.2 \mu m$  で示し、これに比べてスギでは  $D = 0.09 \sim 0.15 \mu m$  であり、やや径の小さい側で見られる。 $Q_c(D)/Q_i = 0.5$  となるのはヒノキ I, II, III がそれぞれ  $D = 0.19, 0.15, 0.14 \mu m$ 、スギ I, II, III が  $D = 0.14, 0.11, 0.11 \mu m$  である。また、全流動体積に対する孔径  $0.087 \mu m$  以上の壁孔膜小孔における流動体積の比率は、ヒノキ I, II, III がそれぞれ 97, 92, 91% で平均約 93%、スギ I, II, III が 86, 81, 80% で平均約 82% である。このように、供試した両樹種とも樹体間で  $Q_c(D)/Q_i$  にあまり差が見られないことは、壁孔膜小孔径の分布に基づく流動体積の分布が樹体間であまり差がないことを示唆する。

供試ヒノキおよびスギの各 3 樹体について、(3-4)式に基づいて図 3-13 の  $Q_c(D)/\Delta P - D$  曲線を図上微分した値  $(dQ_c(D)/dD)/\Delta P$  を  $D$  に対してプロットした流動体積分布曲線を図 3-15 に示す。両樹種とも  $(dQ_c$

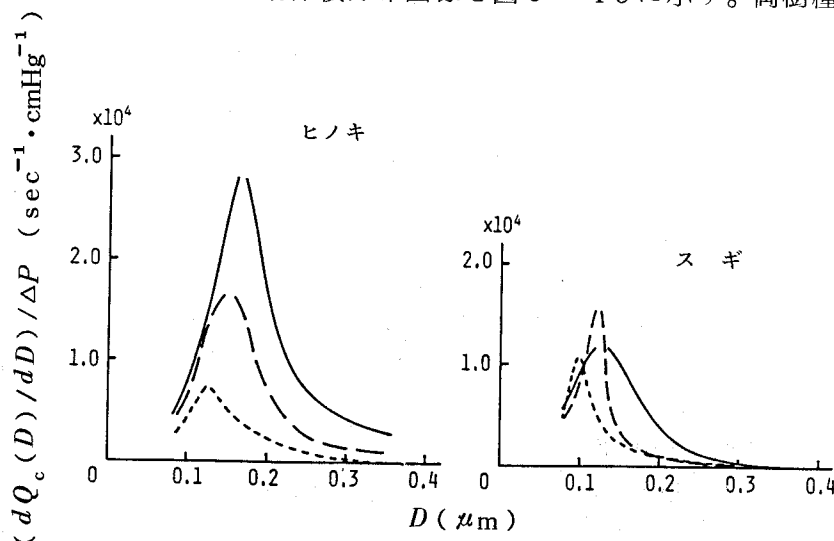


図 3-15 流動体積分布曲線  
——: 樹体 I, - - - -: 樹体 II, - - - -: 樹体 III

$(D)/dD)/\Delta P$  の絶対値は樹体間で異なる。しかし、ピークの位置はヒノキ I, II, III でそれぞれ  $D = 0.17, 0.16, 0.14 \mu\text{m}$ , スギ I, II, III で  $D = 0.13, 0.12, 0.10 \mu\text{m}$  であり、同一樹種では比較的近似し、いずれも孔径の大きい側にすそを引く曲線である。Stamm<sup>21), 63), 68)</sup> は、第 1 章で述べた湿潤空気の流動実験および液-液メニスカスを押し出すのに要する圧力の測定によりウェスタンホワイトパイン心材、シトカスプルス心材について直径  $0.06 \sim 0.15 \mu\text{m}$  にピークを持つ流動体積分布曲線を得ている。樹種、辺・心材の違いはあるが、本実験の結果と比較的近似した曲線である。

さらに、(3-5)式により算出した小孔径の分布関数  $\phi(D)$  を  $D$  に対してプロットした壁孔膜小孔の孔径分布曲線を図 3-16 に示す。ヒノキ、スギともいずれの樹体についても単調減少曲線であり、分布のピークは用いた粒子の最小直径 ( $d = 0.087 \mu\text{m}$ ) 以下にあるものと推定される。この結果は、

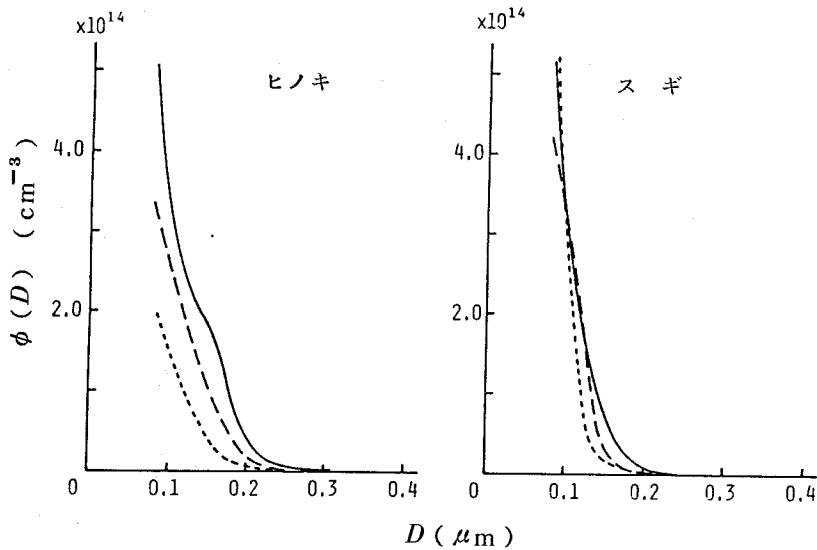


図 3 - 1 6 壁孔膜小孔径分布曲線

——, ———, - - - - - : 図 3 - 1 5 に同じ

画像解析法で四つの直径モードについて得られた壁孔膜小孔の直径の平均値がヒノキ約  $0.078 \mu\text{m}$  , スギ約  $0.070 \mu\text{m}$  の結果とよく一致する。

前述の  $\phi(D)$  の定義から, この曲線と図の横軸および任意の直径  $D_1$  を通る直線で囲まれた面積は, 試験体単位断面積当りの直径が  $D_1$  以上の壁孔膜小孔の数を表わすことになる。そこでいま, 前述のように全流動体積に対する寄与がヒノキ, スギでそれぞれ約 93 , 82 % を占める  $D \geq 0.087 \mu\text{m}$  の 1 壁孔当り小孔数を, この曲線と  $D = 0.087 \mu\text{m}$  を通る直線および横軸で囲まれた面積から, 壁孔についての次の測定値に基づき算出した。すなわち, 供試ヒノキおよびスギの木口面単位断面積当りの仮道管数がともに平均  $1.2 \times 10^5$  個/cm<sup>2</sup> であり, 1 仮道管当りの壁孔数が早材および晩材に重み付けした平均値でヒノキ 75 個, スギ 65 個であった。そして, 供試試験体の厚さから流動通路に 1 個あての壁孔を持つと考えられるので, 流動にかかわる壁孔数を上記 1 仮道管当りの壁孔数の半分とした。その結果, 1 壁孔当りの  $D \geq 0.087 \mu\text{m}$  の小孔数はヒノキ I, II, III がそれぞれ 510 , 400 , 160 個で平均 360

個，スギⅠ，Ⅱ，Ⅲが340，310，240個で平均300個である。このように，両樹種とも壁孔膜小孔数が樹体間で異なったことは，前述の $Q_i/\Delta P$ における樹体間の差が $D \geq 0.087 \mu\text{m}$ の比較的大きな，したがって流動に有効な小孔の個数の差によって説明されることを示唆する。

以上のように，供試したヒノキ，スギともに樹体間で木材の透過性に比例する $Q_i/\Delta P$ に差が見られた。しかし，壁孔膜小孔における流動体積の分布は比較的近似した曲線を示した。また，小孔の孔径分布曲線は，検討することができた粒径範囲内でいずれも単調減少であり，本実験で測定される $D \geq 0.087 \mu\text{m}$ の小孔の個数が透過性と高い相関を持つことが明らかとなった。

ここで，流動式(3-3)を誘導する過程で行なった仮定について考察する。まず，流動は層流状態であると仮定した。第2章の乾燥空気の流動実験の結果から，水の場合 $V/A$ が約 $3.1 \text{ cm/sec}$ 以上で乱流が発生することが推定された。この値に比較して，本実験で $V/A$ の最も大きいヒノキⅠ-4の場合においても $0.369 \text{ cm/sec}$ であり，十分に小さく，流動は層流状態であると考えられる。

また，(3-3)式で，仮道管内こうの流動抵抗を無視し， $\Delta P$ を壁孔膜両端間の圧力差に等しいと仮定した。そこで，次のようにして仮道管内こうと壁孔膜小孔における流動抵抗の比率を算出し，これによる誤差を求めた。いま，仮道管内こうの直径を $30 \mu\text{m}$ ，長さを $4 \text{ mm}$ とする。図3-15で見られる流動体積の分布のピークを示す $D$ を壁孔膜小孔の平均直径とすると，これは供試したヒノキとスギの全試験体の平均で約 $0.14 \mu\text{m}$ である。他方，前述のように1仮道管当りの有効な壁孔数は平均35個， $D \geq 0.087 \mu\text{m}$ の小孔数は全試験体の平均で1壁孔当り約330個，したがって1仮道管当りの小孔数は $1.2 \times 10^4$ 個となる。また，壁孔膜厚さを $0.15 \mu\text{m}$ とする。これらの数値に基づいて，直列であるので流動体積と粘性係数が等しいとして Hagen-Poiseuille 式から算出した仮道管内こうと壁孔膜小孔の流動抵抗の比は0.15:1であった。したがって， $\phi(D)$ の値は各 $D$ においてこの分だけ大きくな

るが、曲線の形にはほとんど影響しないと考えられる。

通路に直列な壁孔数を1個と仮定した。もし2個以上あった場合、1個目の壁孔膜小孔を通過した粒子が次に出会った小孔を閉鎖することになる。したがって、一定流動体積に達するのに要する時間が長くなるが、流動体積の低下量に対する効果は壁孔が1個の場合と同じであると考えられる。このように、流動式(3-3)を誘導する過程で行なった種々の仮定による誤差はあまり大きな影響を及ぼさないと思われる。

### 2.2.3 液体流動における壁孔膜小孔の寄与

前節で、乾燥状態の壁孔膜のTEM写真について画像解析法の適用により、壁孔膜小孔径分布が対数正規分布に近いことを明らかにした。一方、本節の実験では未乾燥状態の試験体を用いており、両者の結果を対比するとき壁孔膜の乾燥による変化が問題となる。すなわち、乾燥による壁孔径の変化およびマルゴのマイクロフィブリル束の幅の収縮(セルロース繊維の直径収縮率9~13%<sup>21)</sup>)が小孔径に影響を及ぼす可能性が考えられる。前者の影響については明らかでないが、後者のマイクロフィブリル束の幅(約0.01~0.2  $\mu\text{m}$ )の収縮は約0.9~2.6 nmと考えられる。これはレプリカ作製の際のPt-Pd蒸着によってマイクロフィブリル束が太くされる(5~10 nm<sup>104)</sup>)ことと相反する効果であり、これら両者の影響が互いにある程度打ち消されるものと考えられる。そこで、画像解析法と本節の実験の結果を次のように対比し、液体流動における壁孔膜小孔の寄与を検討した。

画像解析法の結果から推定したように、壁孔膜小孔の最頻形状は長方形ないしひし形に近い多角形であった。そこで、円形以外の断面を持つ管における流動を考えるとときに用いられる水力平均深さ $hmd$ (=断面積/周辺長)との関連において、画像解析法で得られた結果から以下の検討を行なった。すなわち、画像解析法で得た壁孔膜小孔の平均弦長(= $\pi \times$ 断面積/周辺長)に $4/\pi$ を掛けて、円形断面における直径に相当する $4hmd$ の分布を算出した。さらに、 $4hmd$ の相対累積度数分布から3次スプライン関数による補間法を用いて補

間曲線を求め、その微分値を算出して  $4 h m d$  の相対頻度曲線を得た。供試ヒノキおよびスギに対する壁孔膜小孔の  $4 h m d$  の対数値の相対頻度曲線を相対累積頻度曲線とともに図 3 - 17 に示す。図の相対累積頻度曲線から、 $4 h m d$

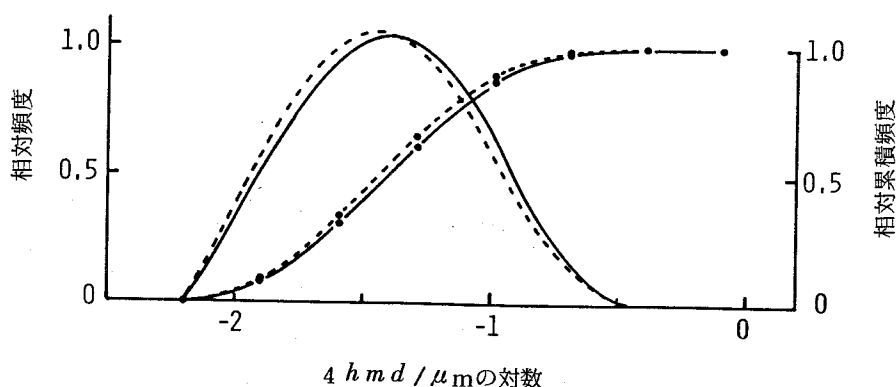


図 3 - 17 壁孔膜小孔の水力平均深さ ( $h m d$ ) の分布  
 — : ヒノキ,    - - - - : スギ

が本懸だく液流動実験で用いた最小粒径  $0.087 \mu m$  ( $= -1.06$ ) より大きい壁孔膜小孔数の比率はヒノキ、スギでそれぞれ約 18, 16% である。これは、前述のように本流動実験で推定された孔径  $0.087 \mu m$  以上の 1 壁孔当りの小孔数 (ヒノキ約 360 個, スギ約 300 個) は全小孔の約 17% であることを示す。さらに、これは、前述のヒノキ、スギにおける全流動体積の約 93, 82% の寄与が全小孔の約 17% に相当するこれらの小孔によることを示す。一方、相対頻度曲線は図からヒノキで約  $-1.40$  ( $= 0.040 \mu m$ ), スギで約  $-1.46$  ( $= 0.035 \mu m$ ) にピークを持ち、いずれも対数正規分布に近い曲線を示す。このことはまた、本流動実験で得られた壁孔膜小孔の孔径分布曲線 (図 3 - 16) が孔径  $0.087 \mu m$  以下に分布のピークを持つと推定された既述の結果と一致する。

次に、壁孔膜小孔の  $4 h m d$  がこのような分布を持つとき、どのような流動体積の分布を示すかを推定するために、Hagen-Poiseuille 則に基づいて流



動体積に比例する 相対頻度  $\times (4 h m d)^4$  を算出した。これらの値を図示した相対流動体積分布曲線を図 3 - 18 に示す。両樹種とも  $4 h m d$  が約 0.23

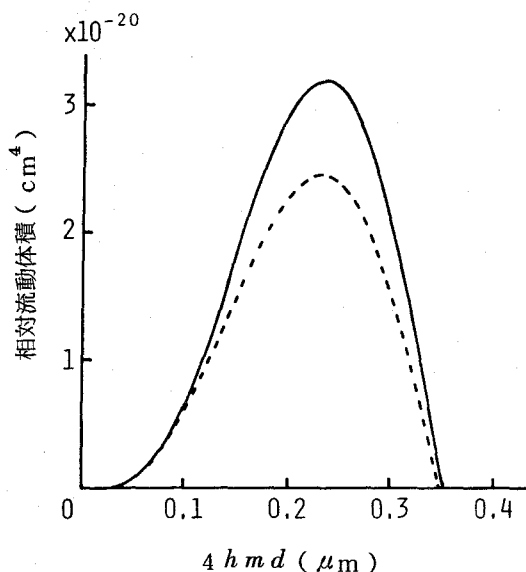


図 3 - 18 壁孔膜小孔における相対流動体積の分布

—— : ヒノキ,      - - - - : スギ

$\mu m$  に相対流動体積のピークを持つ曲線となった。全小孔における相対流動体積を表わす曲線下の面積はヒノキがスギより大きく、供試ヒノキの壁孔がスギのそれより液体流動が容易であることを示唆する。さらに、曲線下の面積から、 $4 h m d$  が  $0.087 \mu m$  以上の壁孔膜小孔における相対流動体積の和はヒノキ、スギでそれぞれ全相対流動体積の約 98, 97% に相当する。これらの値は本流動実験で推定された孔径  $0.087 \mu m$  以上の壁孔膜小孔における流動体積の寄与（ヒノキ約 93%, スギ約 82%）と比べやや大きいものの、比較的近い数値であり、孔径  $0.087 \mu m$  以上の壁孔膜小孔が流動をはば支配することを示唆する。一方、相対流動体積分布のピーク的位置は本流動実験で得られた流動体積分布曲線（図 3 - 15）と比較して径のやや大きい側にある。この差異の原因として、流動実験における孔径  $D$  と画像解析法による  $4 h m d$  という壁

孔膜小孔径の評価法の違いが考えられる。すなわち，球形の粒子が多角形状の壁孔膜小孔に完全に内接して閉鎖するとき， $4 h m d$  は内接円の直径  $D$  と等しくなる。しかし，実際には小孔の形状から考えて粒子が小孔に完全に内接することはまれであり，その場合必ず  $4 h m d \geq D$  となる。例えば，小孔の形状が伸長度 2.3，円形度 0.69 の長方形の場合  $4 h m d$  は  $1.35 D$  となり，両者の評価値にかなり大きな差を生ずる。

### 3 要 約

以上，得られた結果を要約すると以下のようである。

#### 1. 画像解析法による壁孔膜小孔の定量的評価

(1) 形状係数（円形度，伸長度）の検討から，壁孔膜小孔の形状は，だ円に近い多角形から三角形にわたる多様なものを含むが，供試ヒノキとスギおよび早・晩材間ではほとんど差がなく，いずれも最頻形状は長方形またはひし形に近い多角形であった。

(2) 4つの直径モード（平均フェレー径，円相当径，平均弦長，最小幅）で評価した壁孔膜小孔の大きさは， $0.01 \sim 1.0 \mu\text{m}$  のオーダーにわたる広い分布を示し，対数正規分布に近かった。平均値は，早材が晩材より，また供試ヒノキがスギよりやや大きかった。

(3) 壁孔膜小孔の面積は，ほぼ4桁にわたる広い分布を示した。

#### 2. 粒子懸たく液の流動実験による壁孔膜小孔における流動体積の分布

(1) 供試ヒノキおよびスギの壁孔膜小孔における流動体積分布は，それぞれ孔径  $D = 0.14 \sim 0.17$ ， $0.10 \sim 0.13 \mu\text{m}$  にピークを持つ曲線であり，用いた最小粒径  $0.087 \mu\text{m}$  以上の壁孔膜小孔における流動体積が全流動体積のそれぞれ約93，82%に相当することが示された。

(2) 流動体積分布から算出した孔径分布は，用いた粒径範囲内で径の大き

い側に単調減少を示した。孔径分布から算出した1壁孔当りの $D \geq 0.087 \mu\text{m}$ の小孔数は、ヒノキ、スギでそれぞれ平均約360, 300個であった。

(3) 画像解析法の結果から得られる水力平均深さの4倍, すなわち $4 hmd$ と粒子懸だく液流動実験によって得られる孔径 $D$ を対比した結果, 上記の $D \geq 0.087 \mu\text{m}$ の壁孔膜小孔数は全小孔の約17%に相当し, これらの比較的数の小さい壁孔膜小孔が流動をほぼ支配することが明らかとなった。 $4 hmd$ の分布を用いて算出した相対流動体積分布は, 粒子懸だく液の流動実験によって得られた流動体積分布より孔径の大きい側に分布のピークを示した。これは $4 hmd$ と $D$ との評価法の違いによると考えられる。

## 総 括

針葉樹材中の物質の流動通路は仮道管内こうと壁孔膜小孔の直列のものが主体であるが，内こうに比べて径が微小である壁孔膜小孔が流動の支配因子となる。すなわち，壁孔膜小孔は仮道管内こうに比べて大きな流動抵抗を生じて流動をほぼ支配する。さらに，壁孔膜小孔は通路のネック部となって，液体流動体積 $V$ が(1)一定，(2)流動方向の反転で影響を受けない，(3)  $\Delta P$ に比例する，などの条件を満たす定常層流を阻害し，気体流動において分子流の寄与を大きくし，液体および気体流動において乱流を発生させる等の原因となる。従来数多く行なわれてきた木材の透過性の測定や種々の流体を用いた流動実験による通路の定量化の研究では，これらの流動の定常性を無視するか，あるいは非定常からほぼ定常となったときを定常状態とみなしたり，また分子流の影響を無視したり，乱流を考慮しないなどの例が数多く見られた。

木材中の液体流動実験においてしばしば観察されてきた流動体積 $V$ の経時的な低下は，流動液体に含まれる固体粒子による壁孔膜小孔の閉鎖や，小孔通過直後の圧力低下により液体中の溶解空気から発生する気泡による小孔の閉鎖によって，流動に有効な通路が減少することが原因である。本実験の試験体両端間圧力差  $\Delta P = 4.1 \text{ cmHg}$  では，実験中の壁孔膜の移動は原因とはならないことが第2章で明らかとなった。気泡の発生頻度は液体中の溶解空気および疎水性固体粒子の量，通路における圧力低下の大きさによって異なる。このように，液体中の固体粒子は気泡発生の核としても働き，これを除去することは同時に気泡発生の頻度を低下させることにもなり，流動の定常化に寄与するところが大きい。また，壁孔膜の移動を生じるほどの大きな  $\Delta P$  を通路に負荷するとき，気泡発生の頻度も大きくなる。壁孔膜小孔の最小幅，すなわち小孔のまわりに引いた平行2接線間の距離の最小値が，これらの固体粒子や気泡による閉鎖に関係すると考えられる。小孔の最小幅は，画像解析法の結果から平均値でヒノ

キが  $0.062 \mu\text{m}$  , スギが  $0.058 \mu\text{m}$  であり , その対数値の標準偏差が両樹種とも  $0.39$  であって , かなり広い分布を持つ。したがって , このような大きさ以上の固体粒子や気泡が壁孔膜小孔を閉鎖して流動体積を低下させることになる。そこで , 径  $0.01 \mu\text{m}$  の MF で蒸留水をろ過することによって流動液体中の固体粒子をあらかじめ除去し , さらに液体の溶解空気量を低下させ , 低い  $\Delta P$  で流動実験を行なうことによって圧力低下による気泡の発生を低下させるとき , 定常層流条件の一つである一定流動体積が得られることになる。

他方 , 既往の研究で観察されてきた流動方向の反転による  $V$  の変化 , すなわち方向の反転と同時に  $V$  がわずかに増加し , その後徐々に低下するという現象も , 固体粒子や気泡による壁孔膜小孔の閉鎖が原因である。すなわち , 方向の反転で壁孔膜小孔を閉鎖していた固体粒子や気泡が引き離され , 一時的に流動に有効な小孔数が増えて  $V$  が増加する。しかし , 時間の経過とともに固体粒子や気泡が通路の別の壁孔における小孔を閉鎖して再び  $V$  が低下しはじめることになる。また , 既往の研究で  $V$  が  $\Delta P$  と比例しない結果が得られてきた。これも固体粒子や気泡による壁孔膜小孔の閉鎖が原因である。すなわち ,  $\Delta P$  の増大に伴って気泡発生の頻度が大きくなることによる。また同時に , 流速  $v$  が大きくなるために乱流を発生し , これも原因となり得る。以上のように , 液体流動において観察されてきた流動の非定常性の主要な原因は , 通路である壁孔膜小孔を固体粒子や気泡が閉鎖することである。したがって , これらの影響を取り除いて流動実験を行なうとき , 定常層流状態が得られる。

毛管中の気体の流動では粘性流動のほかに分子流が生じる。分子流は , 毛管半径  $r$  と気体分子の平均自由行程  $\lambda$  の関係が  $\lambda/r > 0.164$  のとき , 流動に対する分子流の寄与が粘性流動のそれより大きくなり , 重要となる。針葉樹材の場合 , 主要な通路である仮道管内こうの平均半径を  $10 \mu\text{m}$  , 壁孔膜小孔の平均半径を画像解析法の結果から  $0.02 \sim 0.06 \mu\text{m}$  とすると , これらの通路における  $\lambda/r$  は  $30^\circ\text{C}$  ,  $1$  気圧の空気についてそれぞれ約  $0.007$  ,  $3.4 \sim 1.1$  となる。したがって , 特に壁孔膜小孔において分子流が問題となる。その

結果，針葉樹材中の気体の流動では分子流を伴い，比流動体積  $V p T / A \Delta P T'$  が試験体内の気体の平均圧力  $\bar{p}$  と一次関係で表わされることになる。しかし，流速  $v$  が大きくなると乱流が発生して  $v$  が低下し，この一次関係が成り立たなくなる。また，液体の場合には乱流が発生すると流動体積と  $\Delta P$  の比例関係が成り立たなくなり， $\Delta P$  はほぼ  $v^{1.75}$  に比例するとされている。乱流は，Reynolds 数  $R_e$  が通直管の場合で 2200，屈曲した毛管やオリフィス状の毛管ではこれより低い値で生ずる。 $R_e$  は  $2 v r \rho / \eta$  で算出され， $v$  だけでなく，毛管の大きさや流体の性質に関係する。木材の場合  $r$  が均一でないために  $v$  が求められず， $R_e$  の算出が困難である。しかし， $v$  は試験体内の流体の流動体積，すなわち液体の場合  $V/A$  に，気体の場合  $V p T / A \bar{p} T'$  に比例する。また，液体の場合  $\rho$  および  $\eta$  は圧力にはほぼ無関係で  $T$  に依存し，気体の場合  $\rho$  は  $\bar{p}/T$  に， $\eta$  は圧力に無関係で  $\sqrt{T}$  に，それぞれ比例する。その結果  $R_e$  は，温度が一定のとき同一の試験体および流体について液体の場合  $V/A$  に，気体の場合  $V p T / A \bar{p} T'$  と  $\bar{p}$  の積にそれぞれ比例することになる。したがって，これらを考慮すれば  $R_e$  の評価がある程度可能である。第2章で，樹軸方向厚さ4mmのヒノキ辺材試験体の場合，乾燥空気の実際の流動体積  $V p T / A \bar{p} T' > 50 \text{ cm/sec}$ ，平均圧力  $\bar{p} > 1$  気圧で  $R_e$  が臨界値を越え，乱流が発生することが明らかとなった。これは，この試験体中を水が流動するとき，水の流動体積  $V/A > 3.1 \text{ cm/sec}$  で乱流が発生することを示す。もし，通路が半径  $10 \mu\text{m}$  の均一な仮道管内こうだけから成ると仮定したとき，乱流が発生する流動体積は  $30^\circ\text{C}$  の乾燥空気の場合  $V p T / A \bar{p} T' > 5.5 \times 10^4 \text{ cm/sec}$ ，水の場合  $V/A > 1100 \text{ cm/sec}$  と算出される。この値は，均一な通路としたとき実測値に比べ極めて大きな流動体積まで乱流が発生しないことを示す。このように，通路に壁孔膜小孔があることによって，極めて乱流が発生しやすくなっていることが明らかである。

以上述べたように針葉樹材中の物質の流動をほぼ支配する壁孔膜小孔の定量的評価を，凍結乾燥した壁孔膜のレプリカのTEM写真に画像解析法を適用し

て試みた。形状係数として測定した円形度と伸長度から類推された壁孔膜小孔の形状は、供試したヒノキとスギ辺材およびそれぞれの早・晩材間ではほとんど差がなく、だ円に近い多角形から三角形にわたる多様なものを含むが、最大頻度の形状は長方形ないしひし形に近い多角形であった。四つの直径モードで評価した壁孔膜小孔の大きさは、対数正規分布に近いほぼ3桁にわたる広い範囲の分布を示した。平均値は定義の違いにより各モード間で異なり約  $0.04 \sim 0.13 \mu\text{m}$  であった。また、平均値はいずれも早材が晩材より、供試ヒノキがスギよりやや大であった。したがって、既往の研究において、このように多様な多角形である壁孔膜小孔を円形と仮定していることは明らかな誤りである。また、このように広い分布を持つ小孔の大きさを一つの等価値で表わすことにも問題があることが明らかである。そこで、種々の形状の断面を持つ管における流動を考えるとときに用いられる水力平均深さ  $h_{md}$  の分布を画像解析法の結果から求めた。 $4 h_{md}$  は円形断面の管における直径に相当する。 $4 h_{md}$  が等しい管ではその断面の形状にかかわらず流動体積は等しいことになる。壁孔膜小孔の  $4 h_{md}$  の対数値の分布は、約  $0.035 \sim 0.040 \mu\text{m}$  にピークを持つ対数正規分布に近い曲線となった。

このような孔径分布を持つ壁孔膜小孔を水が流動するとき、どのような流動体積の分布を示すかを検討した。このために、定常層流条件下で、径の均一な数種の粒子懸たく液の流動実験を行なった。そして、各粒径の粒子が壁孔膜小孔を閉鎖することによって生ずる流動体積の低下量から、Hagen - Poiseuille 則を仮定して誘導した流動式により、壁孔膜小孔の流動体積分布曲線を求めた。この方法は壁孔膜小孔の内接円の直径を求めるものである。流動体積分布は孔径  $D = 0.10 \sim 0.17 \mu\text{m}$  にピークを持つ曲線となった。また、この曲線から、本実験で用いた最小粒径 ( $0.087 \mu\text{m}$ ) 以上の孔径を持つ壁孔膜小孔における流動が全流動の約  $80 \sim 97\%$  の寄与を示すことが明らかとなった。画像解析法による  $4 h_{md}$  の分布から、孔径  $0.087 \mu\text{m}$  以上の壁孔膜小孔の数は全小孔の約  $17\%$  であった。このように、本粒子懸たく液流動実験で測定されるような比較的大きな壁孔膜小孔が、全小孔の中で数では小さいものの針葉樹材中の流動をほぼ支配することが明らかである。

## 結

## 言

本研究は、針葉樹材中の主要な流動通路の一つの要素である有縁壁孔膜小孔の物質流動における役割を解明したものである。その結果、壁孔膜小孔は、定常層流の阻害要因となり、その形状は多様で、大きさは広い範囲の分布を持ち、針葉樹材中の流動をほぼ支配すること等が明らかとなった。しかし、供試樹種が限られており、針葉樹材全体について問題が明らかとなったものではない。例えばマツ科の樹種のように、本論文で考察の対象とした主要な流動通路としての仮道管内こう一壁孔膜小孔の直列のもののほかに、樹脂道や放射組織を持つものもある。また、樹木における心材化や木材利用に先立っての乾燥の過程で生じる壁孔膜の移動や閉鎖も問題となる。さらに、液体浸透において毛管上昇の駆動力を生ずるもう一つの主要な通路である仮道管内こうの役割を明らかにする必要がある。これらの基礎データに基づき、上記の種々の問題との関連において木材中の流体浸透の機構を明らかにすることが望まれる。ここで得られた結果が関連分野にいささかでも寄与できれば幸甚である。

最後に、本研究を遂行する過程で、さらには本論文の作成にあたり終始懇切な御指導と激励を賜わった京都大学農学部中戸莞二教授に対し、また、本論文の取りまとめに際し多くの御教示をいただいた京都大学農学部原田 浩教授、京都大学木材研究所西本孝一教授に対し、謹んで謝意を表します。また、本研究を進めていく過程で、京都大学農学部佐道 健助教授には多くの御助言と激励をいただいた。ここに心からの謝意を表します。さらに、京都大学農学部野淵 正助手にはTEM観察において多くの御援助と御助力を、同加藤弘之助手、石丸 優助手には多くの面で御助言をいただいた。ここに深く感謝します。また、画像解析装置をお貸しいただいた島津製作所㈱に深謝します。



## 引用文献

- 1) 中戸莞二：材料，**22**，903(1973)
- 2) 大越 誠，中戸莞二：材料，**28**，572(1979)
- 3) J. F. Siau: "Flow in Wood", Syracuse Univ. Press, New York (1971)
- 4) 島地 謙，須藤彰司，原田 浩：“木材の組織”，森北出版，p.114(1976)
- 5) 原田 浩，宮崎幸男，若島妙子：林試研報，**104**，1(1958)
- 6) 滝沢忠昭，石田茂雄：北大農演習林研報，**29**(2)，189(1972)
- 7) 滝沢忠昭：北大農演習林研報，**31**(3)，481(1974)
- 8) 原田幸夫：“流体の力学”，槇書店，p. 102(1959)
- 9) 市川常雄：“水力学・流体力学”，朝倉書店，p. 37(1966)
- 10) 雨宮昭二：木材学会誌，**8**(2)，81(1962)
- 11) H. Resch and B. A. Ecklund: For. Prod. J., **14**，199 (1964)
- 12) A. J. Bolton and J. A. Petty: J. Microscopy, **104** (1), 33(1975)
- 13) S. J. Davies and C. M. White: Proc. Roy. Soc. Lond., A. **119**，92 (1928)
- 14) S. J. Davies and C. M. White: Engineering, **128**，69 (1929)
- 15) S. J. Davies and C. M. White: Engineering, **128**，98 (1929)
- 16) S. J. Davies and C. M. White: Engineering, **128**，131 (1929)
- 17) R. V. Dooren: Phys. Fluids, **19**(3)，481 (1976)
- 18) A. J. Stamm: J. Agric. Res., **38**(1)，23 (1929)
- 19) A. J. Stamm: "Wood Chemistry Vol. 2", Ed. by L. E. Wise and E. C. Jahn, Maple Press, New York, p. 786 (1952)
- 20) A. J. Stamm: For. Prod. J., **13**，503 (1963)
- 21) A. J. Stamm: "Wood and Cellulose Science", Ronald Press, New York (1964)
- 22) A. J. Stamm: Wood Sci. Technol., **1**，122 (1967)
- 23) G. L. Comstock: For. Prod. J., **15**(10)，441 (1965)
- 24) G. L. Comstock: For. Prod. J., **18**(8)，20 (1968)
- 25) F. O. Tesoro, E. T. Choong and C. Skaar: For. Prod. J., **16**

- (3), 57 (1966)
- 26) F. O. Tesoro, O. K. Kimbler and E. T. Choong: Wood Sci., **5**(1), 21 (1972)
  - 27) F. O. Tesoro, E. T. Choong and O. K. Kimbler: Wood and Fiber, **6**(3), 226 (1974)
  - 28) F. O. Tesoro and E. T. Choong: Holzforschung, **30**(3), 91 (1976)
  - 29) E. I. Sucoff, P.Y.S. Chen and R. L. Hossfeld: For. Prod. J., **15**, 321 (1965)
  - 30) G. Bramhall: Wood Sci. Technol., **5**, 121 (1971)
  - 31) M. S. Hudson and S. V. Shelton: For. Prod. J., **19**(5), 25 (1969)
  - 32) M. Muskat: "The Flow of Homogeneous Fluids through Porous Media", McGraw-Hill Book Company, New York and London (1937)
  - 33) B. Huber and W. Merz: Planta, **51**, 645 (1958)
  - 34) E. T. Choong and O. K. Kimbler: Wood Sci., **4**(1), 32 (1971)
  - 35) H. D. Erickson and E. M. Estep: For. Prod. J., **12**, 313 (1962)
  - 36) W. C. Kelso, Jr., R. O. Gertjeansen and R. L. Hossfeld: Univ. Minn. Agric. Exp. Sta. Tech. Bull., **242**, 1 (1963)
  - 37) R. T. Lin, E. P. Lancaster and R. L. Krahmer: Wood and Fiber, **4**(4), 278 (1973)
  - 38) P. J. Bailey and R. D. Preston: Holzforschung, **24**(2), 37 (1970)
  - 39) J. A. Petty: Proc. Roy. Soc. Lond., B. **181**, 395 (1972)
  - 40) G. L. Comstock: For. Prod. J., **17**(10), 41 (1967)
  - 41) J. A. Petty and R. D. Preston: Proc. Roy. Soc. Lond., B. **172**, 137 (1969)
  - 42) D.N.R. Smith and W. B. Banks: Proc. Roy. Soc. Lond., B. **177**, 197 (1971)
  - 43) P. C. Carman: "Flow of Gases through Porous Media", Butterworths Sci. Pub., London (1956)
  - 44) W. J. Moore, 藤代亮一訳: "新物理化学(上),(下)", 東京化学同人(1964)
  - 45) H. Adzumi: Bull. Chem. Soc. Japan, **12**(6), 304 (1937)

- 46) L. P. Sebastian, W. A. Côté and C. Skaar: For. Prod. J., **15**, 394 (1965)
- 47) J. A. Petty: Proc. Roy. Soc. Lond., B. **175**, 149 (1970)
- 48) J. A. Petty and G. S. Puritch: Wood Sci. Technol., **4**, 140 (1970)
- 49) J. A. Petty: Wood Sci. Technol., **8**, 275 (1974)
- 50) A. J. Bolton and J. A. Petty: Wood Sci., **9**(4), 187 (1977)
- 51) A. J. Bolton and J. A. Petty: Wood Sci. Technol., **12**, 37 (1978)
- 52) A. J. Bolton and J. A. Petty: Wood Sci. Technol., **12**, 111 (1978)
- 53) E. T. Choong, F. O. Tesoro and F. G. Manwiller: Wood and Fiber, **6**(1), 91 (1974)
- 54) E. T. Choong, C. W. McMillin and F. O. Tesoro: Wood Sci., **7**(4), 319 (1975)
- 55) J. F. Siau: For. Prod. J., **19**(6), 36 (1969)
- 56) P. J. Fogg: Wood Sci., **2**(1), 35 (1969)
- 57) L. J. Klinkenberg: Drilling Prod. Pract. Amer. Petrol. Inst., p. 200 (1941)
- 58) R. T. Lin: Wood Sci., **5**(2), 125 (1972)
- 59) R. W. Hanks and H. L. Weissberg: J. Appl. Phys., **35**(1), 142 (1964)
- 60) F. C. Johansen: Proc. Roy. Soc. Lond., A. **126**, 231 (1930)
- 61) A. T. Wiley and E. T. Choong: Wood and Fiber, **6**(4), 298 (1975)
- 62) H. L. Weissberg: Phys. Fluids, **5**(9), 1033 (1962)
- 63) A. J. Stamm: Physics, **6**, 334 (1935)
- 64) P. Frenzel: Planta, **8**, 642 (1929)
- 65) W. A. Côté and R. L. Krahmer: Tappi, **45**(2), 119 (1962)
- 66) W. Liese: "Cellular Structure of Woody Plants", Ed. by W. A. Côté, Syracuse Univ. Press, New York, p. 271 (1965)
- 67) R. A. Megraw: For. Prod. J., **17**(11), 29 (1967)
- 68) A. J. Stamm and E. Wagner: For. Prod. J., **11**(3), 141 (1961)

- 69) A. J. Stamm: For. Prod. J., **16**(12), 59 (1966)
- 70) A. J. Stamm, S. W. Clary and W. J. Elliott: Wood. Sci., **1**(2), 93 (1968)
- 71) A. J. Stamm: Wood Sci. Technol., **4**, 81 (1970)
- 72) A. J. Stamm: Wood and Fiber, **1**(4), 263 (1970)
- 73) A. J. Stamm: Wood Sci. Technol., **7**, 212 (1973)
- 74) 大越 誠, 中戸莞二, 佐道 健: 木材学会誌, **22**(1), 54(1976)
- 75) 日本化学会編: “化学便覧”, 丸善, p. 620(1966)
- 76) 大越 誠, 中戸莞二, 佐道 健: 木材学会誌, **26**(6), 381(1980)
- 77) R. J. Thomas and D. D. Nicholas: For. Prod. J., **16**(3), 53 (1966)
- 78) R. J. Thomas: Holzforschung, **22**(2), 38 (1968)
- 79) R. J. Thomas: Wood and Fiber, **1**(2), 110 (1969)
- 80) W. A. Côté: For. Prod. J., **8**(10), 296 (1958)
- 81) W. A. Côté: J. Polym. Sci., C. **2**, 231 (1963)
- 82) A. Frey-Wyssling, H. H. Bosshard and K. Mühlethaler: Planta, **47**, 115 (1956)
- 83) 原田 浩: 第65回日本林学会大会講演集, 1 (1956)
- 84) I. B. Sachs and R. E. Kinney: Wood Sci., **6**(3), 200 (1974)
- 85) J. L. Tschernitz and I. B. Sachs: Wood and Fiber, **6**(4), 332 (1975)
- 86) J. Bauch, W. Liese and R. Schultze: Wood Sci. Technol., **6**, 165 (1972)
- 87) 石田茂雄, 藤川清三: 北大農演習林研報, **27**(2), 355(1970)
- 88) 藤川清三, 石田茂雄: 木材学会誌, **18**(10), 477(1972)
- 89) 藤川清三, 石田茂雄: 木材学会誌, **19**(9), 413(1973)
- 90) 原田 浩: 木材学会誌, **10**(6), 221(1964)
- 91) Y. Imamura and H. Harada: Wood Sci. Technol., **7**, 189 (1973)
- 92) Y. Imamura, H. Harada and H. Saiki: Wood Sci. Technol., **8**, 243 (1974)
- 93) W. Liese: Ber. Dtsh. Bot. Ges., **66**, 202 (1953)
- 94) W. Liese and J. Bauch: Wood Sci. Technol., **1**, 1 (1967)

- 95) R. L. Krahmer and W. A. Côté: Tappi, **46**(1), 42 (1963)
- 96) E. W. Phillips: Forestry, **7**, 109 (1933)
- 97) 貴島恒夫, 林 昭三: 木材研究, **27**, 22(1967)
- 98) C. A. Hart and R. J. Thomas: For. Prod. J., **17**(11), 61 (1967)
- 99) G. L. Comstock and W. A. Côté: Wood Sci. Technol., **2**, 279 (1968)
- 100) R. J. Thomas and K. P. Kringstad: Holzforschung, **25**(5), 143 (1971)
- 101) 大越 誠, 中戸莞二, 佐道 健: 木材学会誌投稿中
- 102) 諏訪紀夫: “定量形態学—生物学者のためのstereology—”, 岩波書店(1977)
- 103) A. Rosenfeld and A. C. Kak, 長尾 真監訳: “ディジタル画像処理”, 近代科学社(1978)
- 104) 坂 志朗, 後藤俊幸, 原田 浩, 佐伯 浩: 京大農演習林報告, **48**, 192(1976)
- 105) 大越 誠, 中戸莞二, 佐道 健: 木材学会誌, **24**(3), 171(1978)
- 106) 大越 誠, 中戸莞二, 佐道 健: 木材学会誌投稿中
- 107) J. Brandrup and E. H. Immergut: "Polymer Handbook", Intersci. Publish., New York· London· Sydney, p. IV 363 (1966)